

GUILHERME CRUZ SOARES DA SILVA
LUCAS PEDUTO GIANGIULIO FERNANDES

**ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA
ESTRUTURAL**

São Paulo – SP

2019

GUILHERME CRUZ SOARES DA SILVA
LUCAS PEDUTO GIANGIULIO FERNANDES

**ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA
ESTRUTURAL**

Texto apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica como parte dos requisitos para conclusão da disciplina Trabalho de Formatura em Projeto Estrutural e Geotécnico II.

Orientador:

Prof. Dr. Claudius de Sousa Barbosa

São Paulo – SP

2019

RESUMO

Os ensaios não destrutivos (END) são utilizados há bastante tempo para avaliar as propriedades mecânicas e características do concreto plástico, destacando-se os ensaios de ultrassom e de dureza superficial. Na alvenaria estrutural tipicamente utilizada no Brasil, a utilização desses ensaios ainda não está disseminada, tendo sido registrados algumas análises específicas tanto em laboratório quanto em obras. Apesar desse sistema estrutural estar amplamente difundido e suas normas técnicas consolidadas, inclusive, nos últimos anos, com seu dimensionamento tendo sido atualizado para o Método dos Estados Limites, ainda existem diversos pontos que devem ser melhor estudados, desde o comportamento global do sistema estrutural como em relação a análises mais específicas de seus componentes – unidade e argamassa. A principal propriedade mecânica desse sistema estrutural é, sem dúvida, sua resistência à compressão, que como já é de amplo conhecimento, tem um valor indicativo quando ensaiada a unidade, mas que reduz quando considerado o prisma ou a parede. A NBR 15961 (2010), em processo de revisão, deve apresentar diretrizes para extração de testemunhos de uma estrutura já executada, a fim de avaliar, as propriedades mecânicas da estrutura. O objetivo deste trabalho é contribuir para o entendimento ou viabilidade da execução de ensaios não destrutivos em blocos vazados de concreto estrutural de maneira a correlacionar os resultados com suas propriedades mecânicas, obtidas em ensaios à compressão axial. Foram realizados ensaios de velocidade de onda ultrassônica e de dureza da superfície, correlacionando os resultados com a resistência à compressão e sua deformabilidade. Os ensaios foram realizados em amostras que representam três grupos de resistência, priorizando, num primeiro instante, o estudo da variabilidade de resultados em função da posição do ensaio e, em seguida, avaliado-se o efeito da pré-compressão nos resultados dos ensaios END. É evidente que uma correlação com a resistência de prismas e paredes ainda se situaria num futuro bem mais distante, mas os resultados poderão permitir um avanço para o controle de qualidade destes componentes na obra ou até de suas características depois de executado, numa parede estrutural.

Palavras-chave: alvenaria estrutural, blocos de concreto, ensaios não destrutivos, propriedades mecânicas.

Agradecimentos

Agradecemos, em primeiro lugar, ao professor Claudius de Sousa Barbosa, que se propôs a iniciar os alunos no tema e introduzi-los nos procedimentos laboratoriais e metodologia científica, além de se propor a conseguir os equipamentos e pessoal necessários para conclusão deste trabalho.

Agradecemos à Escola Politécnica por permitir, sem grandes entraves burocráticos, que os alunos pudessem frequentar o laboratório sempre que necessário e nos escassos horários de que dispunham. Ao Departamento de Construção Civil (PCC) da Escola Politécnica da USP que nos forneceu tanto o esclerômetro como a prensa para realização dos ensaios.

Este trabalho não seria possível sem o apoio da empresa Dibloco, que forneceu todos os blocos ensaiados e estudados neste trabalho, inclusive em número muito maior que o realmente necessário, blocos esses que o grupo deixará como espólio àqueles que estiverem dispostos a seguir linhas de trabalho similares e necessitarem de material para fazê-lo.

Não podemos deixar de agradecer as empresas ABCP, que realizou a retífica dos blocos, e a Progescon, que nos forneceu os extensômetros necessários para as medições. Ao técnico Rodrigo também deixamos nossos agradecimentos.

Finalmente, agradecemos às nossas famílias e amigos pelo apoio, em todos os sentidos.

RESUMO	3
1. INTRODUÇÃO	7
1.1 Justificativa.....	8
1.2 Objetivo	8
1.3 Estrutura do texto	9
2. EMBASAMENTO TEÓRICO.....	10
2.1 Projeto alvenaria estrutural.....	10
2.2 Propriedades da alvenaria estrutural.....	12
2.3 Dureza superficial do concreto.....	16
2.4 Ultrassom	20
2.5 Curvas de correlação	26
3. METODOLOGIA	29
3.1 Grupos de resistência.....	29
3.2 Caracterização dos blocos	29
3.3 Ensaio não destrutivos	32
3.3.1 Dureza superficial.....	34
3.3.2 Velocidade de pulso ultrassônico	36
3.4 Ensaio de ultrassom com carregamento.....	39
3.5 Ensaio de resistência à compressão	40
3.6 Análise estatística	44
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	45
4.1 Ensaio de velocidade de pulso ultrassônico	45
4.2 Ensaio de dureza superficial.....	53
4.3 Ensaio velocidade de pulso ultrassônico com aplicação de cargas de compressão.....	56
4.4 Ensaio de compressão axial.....	70
4.5 Correlação entre os ensaios não destrutivos e de compressão axial	75

4.5.1	Ensaio de ultrassom indireto	76
4.5.2	Ensaio de ultrassom direto.....	78
4.5.3	Ensaio de dureza superficial	80
5.	CONCLUSÃO	84
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1. INTRODUÇÃO

A alvenaria é um sistema construtivo muito tradicional e utilizado há muitas décadas. Presente em praticamente todas as obras de edificações criadas, sua principal aplicação é como vedação, porém ela pode ser empregada também para resistir ao carregamento da edificação, sendo denominada, nesse caso, Alvenaria Estrutural.

Esse sistema cumpre duas funções, ao mesmo tempo em que ela atua como vedação, também possui função estrutural, evitando dessa maneira a necessidade da existência dos pilares e vigas como no sistema estrutural convencional. A vantagem econômica é o principal motivo do crescimento deste sistema construtivo e segundo Mohamad (2015), a otimização de tarefas na obra, por meio de técnicas executivas simplificadas e facilidade de controle nas etapas de produção e eliminação de interferências, gerando uma redução no desperdício de materiais produzido pelo constante retrabalho, permite uma flexibilidade no planejamento das etapas de execução e uma diminuição dos custos totais. Este fato tornou o sistema competitivo no Brasil.

Apesar de muito competitivo, as possíveis vantagens de custo na implementação desse sistema construtivo causado principalmente pela dupla função da alvenaria, eliminando alguns elementos, também trazem preocupações. Para ser capaz de receber as cargas e funcionar com a função estrutural, a alvenaria tem a necessidade de ter sua resistência perfeitamente controlada, garantindo a segurança da estrutura. De acordo com Ramalho e Corrêa (2003), esta necessidade demanda a utilização de materiais mais caros e uma execução mais cuidadosa, tornando a alvenaria estrutural mais onerosa do que a alvenaria de vedação.

Com base nesse maior controle da resistência da alvenaria estrutural, o acompanhamento em obra e verificação dos requisitos, tanto da alvenaria como dos blocos que a compõem, são de extrema importância. Este controle é realizado por meio de ensaios destrutivos em blocos, prismas e paredes, submetidos à compressão em um equipamento específico em laboratório. Essa análise experimental permite a definição das propriedades físicas e mecânicas dos materiais que compõem o sistema estrutural, com destaque para a resistência à compressão, principal propriedade da alvenaria.

Nos últimos anos, houve um grande crescimento no uso de ensaios não destrutivos para avaliar as propriedades mecânicas e características do concreto plástico, destacando-se os ensaios de ultrassom e de dureza superficial. Esses métodos são relevantes não só para o caso de estruturas já executadas quando apresentam problemas e têm que ser reparadas e/ou reforçadas, mas também para o caso de estruturas novas ou ainda em execução, quando poderiam ser utilizadas como ensaios de aceitação.

Acontece que estes métodos, até o presente momento, foram pouco aplicados nas unidades de alvenaria estrutural. De fato, não se pode realizar uma aplicação direta e sem critérios, já que o sucesso da utilização dessas técnicas depende, além do conhecimento e da experiência do profissional que os realiza, de uma análise aprofundada da alvenaria estrutural e seus componentes, como o bloco.

O presente trabalho busca, neste âmbito, a realização de ensaios não destrutivos de ultrassom e dureza superficial em blocos de vazados de concreto, com o objetivo de correlacionar os resultados com as propriedades mecânicas obtidas por meio de ensaios destrutivos. De maneira alguma a proposta seria uma alternativa para substituir a metodologia consagrada de ensaio, mas permitir a complementação destes ensaios. Dessa maneira, os ensaios não destrutivos podem ser utilizados para a verificação de estruturas já executadas, podendo proporcionar uma maior velocidade nesta etapa.

1.1 Justificativa

Apesar de difundido no concreto plástico, os ensaios não destrutivos são pouco explorados ao se tratar de alvenaria estrutural. Com os cronogramas cada vez mais apertados, ensaios não destrutivos podem complementar os ensaios padrão, garantindo uma maior agilidade na verificação de estruturas e diminuindo a necessidade de retirada de amostras, preservando a alvenaria e o próprio bloco.

1.2 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é correlacionar os resultados de ensaios de ultrassom e dureza superficial com as propriedades mecânicas de um bloco vazado de concreto de alvenaria estrutural.

Como objetivos específicos, apresentam-se:

- Caracterizar a variação dos resultados de END com a posição de execução do ensaio no bloco: septos longitudinais, paredes longitudinais ou medição direta ou indireta com ultrassom;
- Correlacionar os resultados de ensaios END com a resistência à compressão seguindo recomendações contidas na norma NBR 12118 (2014);
- Determinar a influência da pré-compressão da unidade na alteração dos resultados obtidos por meio do END;
- Validar os resultados experimentais por meio de análise estatística.

Além disso, em relação à formação dos alunos de Graduação, tem-se como objetivo de inseri-los no ambiente de aplicação de normas e conceitos, permitindo o desenvolvimento de análises teóricas e experimentais.

1.3 Estrutura do texto

Após a breve introdução do tema dos assuntos abordados, da justificativa e dos objetivos do trabalho feitos no Capítulo 1, é apresentada a revisão bibliográfica no Capítulo 2, abordando os principais aspectos e informações relevantes, tanto da alvenaria estrutural como dos ensaios não destrutivos. Além disso uma breve discussão de resultados presentes na literatura sobre as curvas de correlação dos ensaios com a resistência do concreto é realizada.

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia experimental, onde são explicados os procedimentos para cada ensaio, suas características e instrumentos utilizados. Além disso, a execução dos ensaios é detalhada e exemplificada por imagens. Por fim, detalha-se a metodologia estatística adotada para análise dos resultados.

No Capítulo 4 apresenta-se a análise dos resultados com as comparações e correlações de interesse. Dando sequência, as conclusões e recomendações para futuros trabalhos são apresentadas no Capítulo 5.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

Apresentam-se a seguir alguns conceitos sobre o comportamento e dimensionamento das estruturas em Alvenaria para em seguida, discutir os principais aspectos dos ensaios não-destrutivos propostos neste trabalho.

2.1 Projeto alvenaria estrutural

A alvenaria estrutural se difere de uma simples alvenaria de vedação pelo seu conceito estrutural básico. Segundo Ramalho e Corrêa (2003), o principal conceito estrutural ligado à utilização da alvenaria estrutural é a transmissão de ações através de tensões de compressão. Este fator é de extrema importância para se entender seu uso como processo construtivo para estruturas, não só possuindo a função de vedação, como a função estrutural. É evidente que tensões de tração também existem, mas de valores muito menores e em pontos específicos. Logo, para um projeto tecnicamente e economicamente viável é necessário que a alvenaria estrutural esteja submetida prioritariamente a forças de compressão.

Apesar do grande emprego da alvenaria como sistema estrutural entre a antiguidade e o período da revolução industrial, o conhecimento e as pesquisas na área eram praticamente inexistentes, além da total falta do conhecimento da racionalização. Desta maneira não se conseguia garantir a segurança estrutural apenas com o conhecimento de teorias empíricas, forçando a se projetar de forma superdimensionada. Um exemplo disto foi o edifício Monadnock (Figura 1), construído em Chicago de 1889 a 1891. Possuía 16 pavimentos, 65 metros de altura e paredes de 1,80 metros de espessura no pavimento térreo, onde apesar de considerado uma obra ousada e marcante para a alvenaria estrutural, segundo Mohamad (2015), apresentou dificuldades de racionalização do processo executivo e limitações de organização espacial, tornando o sistema lento e de custo elevado. Ramalho e Corrêa (2003) acreditam que se fosse dimensionado pelos procedimentos utilizados atualmente, com os mesmos materiais, a espessura da parede seria inferior a 30 cm, mostrando o superdimensionamento da estrutura.

Figura 1 – Edifício Monadnock, construído em alvenaria estrutural



Fonte: Construções em alvenaria estrutural – Materiais, projetos e desempenho, 2011

Além disso, segundo Mohamad (2015), com o aparecimento do aço e do concreto as obras se tornaram mais versáteis em termos de produção, esbeltez e, principalmente, obtenção de grandes vãos, garantindo a chamada busca pela liberdade arquitetônica. Isto fez com que, juntamente com a falta de conhecimento e pesquisa na área de alvenaria estrutural, este sistema construtivo entrasse em desuso no mercado, sendo utilizado apenas como elemento de fechamento ou como elemento estético.

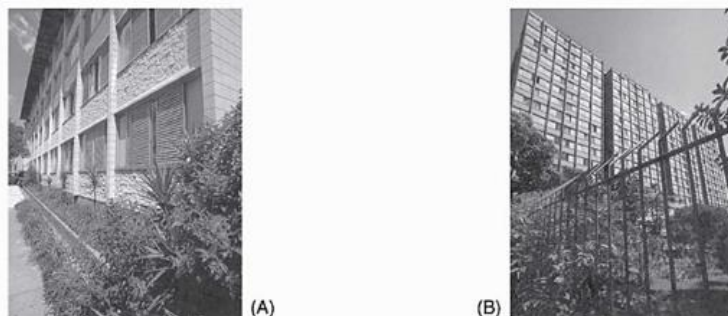
Por volta da metade do século XX, segundo Mata (2006), em razão da necessidade do mercado em buscar técnicas alternativas de construção, principalmente em face a escassez de concreto e de aço proporcionada pela Segunda Guerra Mundial, as construções de alvenaria voltaram a ser executadas. Desta vez, estas obras estavam acompanhadas de pesquisas realizadas em vários países, com destaque para os estudos realizados pelo professor Paul Haller na Suíça, conduzindo testes em mais de 1.600 paredes de tijolos e segundo Mohamad (2015) marcando o início da “Moderna Alvenaria Estrutural”.

No Brasil, pode-se dizer que apenas na década de 1960 que o sistema estrutural em alvenaria se difundiu de fato. Nesta década surgiram construções de habitações populacionais de até 4 pavimentos em São Paulo (Figura 2A). Segundo Mata (2006), este processo foi utilizado em programas públicos, em grandes conjuntos habitacionais, propiciando um preconceito de que a alvenaria estrutural é uma solução exclusiva para habitações populares de poucos pavimentos.

Edifícios mais elevados surgiram na década de 1970, também em São Paulo. Segundo Ramalho e Corrêa (2003) destacam-se o condomínio Central Parque Lapa (Figura 2B), com 12 pavimentos em alvenaria armada de blocos de concreto, o edifício Muriti com 16 pavimentos também em alvenaria armada de blocos de concreto, e o

edifício Jardim Prudência, pioneiro no uso de alvenaria não armada, com 9 pavimentos em blocos de concreto de silicocalcário. Por fim blocos cerâmicos começaram a ser adotados no Brasil a partir da década de 1980, com o uso de unidades modulares e furos na vertical.

Figura 2 – Primeiros edifícios em alvenaria estrutural do Brasil



Fonte: Projetos de edifícios de alvenaria estrutural, 2011

Ressalta-se, ainda, a grande produção científica desta época (anos 1970 e 1980) que acompanhou o crescimento da utilização de alvenaria estrutural no Brasil descrito acima. Muitos dos estudos laboratoriais iniciais em território nacional se deram na própria Escola Politécnica da USP e ajudaram a ajustar às características nacionais o *know how* do setor.

2.2 Propriedades da alvenaria estrutural

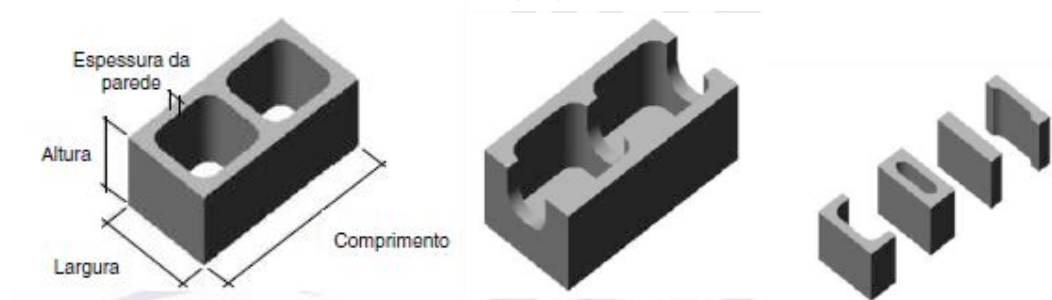
Segundo Ramalho e Corrêa (2003), entende-se por componente da alvenaria uma entidade básica, ou seja, algo que compõe os elementos que, por sua vez, comporão a estrutura. Os componentes principais da alvenaria estrutural são: blocos (também chamados de unidades), argamassa, graute e armadura. Já os elementos são formados pela junção de dois ou mais componentes, sendo eles: paredes, pilares, cintas, vergas, etc.

O chamado bloco, ou unidade, segundo a norma NBR 15961-1:2011 é o componente básico da alvenaria estrutural, sendo este o principal componente de estudo deste trabalho. Suas três dimensões principais são: comprimento, largura e altura. O comprimento e, com menos importância a largura, definem o módulo horizontal, enquanto a altura define o módulo vertical. Quanto ao material, as unidades mais utilizadas no Brasil são: de concreto, cerâmicos e sílico-calcáreas. O presente trabalho

discutirá apenas o bloco de concreto, mais difundido e utilizado nas edificações de alvenaria estrutural.

Uma definição importante para o entendimento da unidade é a chamada família de bloco, definido segundo a norma NBR 6136:2014 como o conjunto de componentes de alvenaria que interagem modularmente entre si e com outros elementos construtivos. Os blocos que compõem a família, segundo suas dimensões, são designados como bloco inteiro (bloco mais comum), meio bloco, blocos de amarração L e T (blocos para encontro de paredes), blocos compensadores e blocos tipo canaleta. Destacando-se o bloco inteiro (também chamado de bloco vazado de concreto simples), o bloco tipo canaleta e o bloco compensador. O primeiro é considerado como padrão, definido como componente para execução de alvenaria, com ou sem função estrutural, vazada nas faces superior e inferior, cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta, como pode ser visto na Figura 3A. Já a unidade do tipo canaleta é um componente de alvenaria, vazado ou não, com conformação geométrica conforme a Figura 3B, criados para racionalizar a execução de vergas, contravergas e cintas. Por fim, o bloco compensador é um componente especial de alvenaria destinado para ajuste de modulação, como mostra a Figura 3C.

Figura 3 – (A) bloco vazado de concreto (esq.) (B) bloco tipo canaleta (meio) (C) bloco compensador (dir)



Fonte: NBR 6136, 2014

Os outros componentes da alvenaria estrutural são: junta de argamassa, graute e armadura. Sendo o primeiro definido pela norma NBR 15961-1:2011 como componente utilizado na ligação dos blocos, enquanto o graute é definido pela mesma norma como componente utilizado para preenchimento de espaços vazios de blocos, com a finalidade de solidarizar armaduras à alvenaria ou aumentar sua capacidade resistente. Por isso, este componente é usado principalmente quando o bloco sozinho não resiste as forças à que ele está submetido. A utilização do graute deve ser estudado com grande cautela,

pois seu uso encarece o sistema construtivo, tornando-o inviável para uso generalizado. Por fim a armadura que funciona exatamente como no concreto armado, ajudando a unidade há eventuais tensões de tração que apareçam.

Para um bom comportamento e durabilidade, os blocos de concreto devem cumprir requisitos. Segundo a norma NBR 6136:2014, as dimensões nominais dos blocos vazados de concreto devem seguir as dimensões da Tabela 1, assim como a espessura mínima de qualquer parede do bloco deve atender a mesma norma. Os blocos devem atender aos limites de resistência, absorção e retração linear por secagem estabelecidos na Tabela 2.

Tabela 1 – Dimensões nominais

Familia		20 x 40	15 x 40	15 x 30	12,5 x 40	12,5 x 25	12,5 x 37,5	10 x 40	10 x 30	7,5 x 40	
Medida Nominal mm	Largura	190	140		115			90		65	
	Altura	190	190	190	190	190	190	190	190	190	
	Comprimento	Inteiro	390	390	290	390	240	365	390	290	390
		Meio	190	190	140	190	115	-	190	140	190
		2/3	-	-	-	-	-	240	-	190	-
		1/3	-	-	-	-	-	115	-	90	-
		Amarração "L"	-	340	-	-	-	-	-	-	-
		Amarração "T"	-	540	440	-	365	-	-	290	-
		Compensador A	90	90	-	90	-	-	90	-	90
		Compensador B	40	40	-	40	-	-	40	-	40
		Canaleta inteira	390	390	290	390	240	365	390	290	-
		Meia canaleta	190	190	140	190	115	-	190	140	-
	NOTA 1 As tolerâncias permitidas nas dimensões dos blocos indicados nesta Tabela são de ± 2,0 mm para a largura e ± 3,0 mm para a altura e para o comprimento.										
NOTA 2 Os componentes das famílias de blocos de concreto têm sua modulação determinada de acordo com a ABNT NBR 15873.											
NOTA 3 As dimensões da canaleta J devem ser definidas mediante acordo entre fornecedor e comprador, em função do projeto.											

Fonte: NBR 6136,2014

Tabela 2 – Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial ^a MPa	Absorção %				Retração ^d %
			Agregado normal ^b		Agregado leve ^c		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$
	B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$			
Com ou sem função estrutural	C	$f_{bk} \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$			

^a Resistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias.

^b Blocos fabricados com agregado normal (ver definição na ABNT NBR 9935).

^c Blocos fabricados com agregado leve (ver definição na ABNT NBR 9935).

^d Ensaio facultativo.

Fonte: NBR 6136, 2014

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), a resistência à compressão é, como pode-se imaginar, o parâmetro de resistência mais importante para a alvenaria estrutural, visto que o seu funcionamento estrutural é basicamente resistir à tensão de compressão. Cada componente possui influência sobre a resistência à compressão da alvenaria. O componente que apresenta maior influência é o bloco. Principal componente do elemento, de forma geral, quanto mais resistente o bloco, mais resistente será a alvenaria. Ramalho e Corrêa (2003) comentam um conceito muito antigo e importante sobre a influência da resistência do bloco sobre a resistência da parede, chamada de “eficiência”, ou seja, a relação entre a resistência da parede e a resistência do bloco que a compõe.

Muitos fatores no bloco influenciam esta eficiência, como sua forma, dimensões, material e até a própria resistência do bloco. No geral, quanto maior a resistência do bloco, menor será a eficiência, logo mais próximo serão as resistências da parede e da unidade. Portanto pode-se dizer em termos gerais que quanto mais resistente for um bloco, maior será sua influência na resistência do elemento parede.

A argamassa também possui forte influência na resistência à compressão do elemento. Francis (1971) apud Ramalho e Corrêa (2003) comprovou em seu trabalho que a resistência da parede decresce com o aumento da espessura da junta horizontal. Isto ocorre pois o aumento da espessura provoca a diminuição do confinamento da argamassa, principal fator da resistência dela. A norma NBR 15961-2:2011 em

concordância com este fato, especifica que as juntas horizontais devem ter espessura de 10 e, exceto as juntas horizontais da primeira fiada. A resistência à compressão da argamassa possui fraca influência na resistência à compressão da parede, sendo considerada apenas se a resistência da argamassa for menor do que 30% da resistência do bloco.

A influência do grauteamento em blocos vazados de concreto na resistência das paredes é simples. O graute leva a um aumento da área líquida da unidade, aumentando a resistência do bloco e assim a resistência da parede, considerando a já mencionada eficiência bloco-parede. Já a componente armadura não apresenta praticamente nenhuma influência na resistência à compressão do elemento, não sendo indicado seu uso para este fim.

Apesar da influência dos componentes na resistência à compressão da alvenaria, a norma NBR 15961-1:2011 diz que a resistência característica à compressão simples da alvenaria (f_k) deve ser determinada no ensaio de paredes (NBR 8949) ou ser estimada como 70% da resistência característica de compressão simples de prisma (f_{pk}) ou 85% da de pequena parede (f_{ppk}). Estas resistências devem ser determinadas de acordo com as especificações da norma NBR 15961-2:2011. Entretanto, o foco de estudo deste trabalho será a unidade e sua resistência à compressão, que já foi vista anteriormente como a principal influência e condicionante para a resistência a compressão da alvenaria. Como já visto na Tabela 2, para ser classificado com função estrutural, a resistência característica à compressão axial deve ser no mínimo de 3 MPa (f_{bk}). Desta maneira, os blocos estudados e ensaiados no presente trabalho atenderão este requisito.

2.3 Dureza superficial do concreto

Ensaaios com o objetivo de determinar a dureza superficial do concreto são prática comum na engenharia civil e, de acordo com Bungey (1989), começaram por volta da década de 1930. O princípio básico utilizado para medir a dureza superficial é baseado na teoria do choque elástico, fundamentado principalmente na mecânica newtoniana. Com um sistema massa-mola de valores conhecidos, isto é, a massa e rigidez do sistema, é possível determinar a dureza de uma superfície contra qual o sistema colide a partir do “rebote”, ou o recuo do sistema após a colisão. Por mais que os aparelhos utilizados nesse ensaio, chamados esclerômetros, tenham passado por desenvolvimento

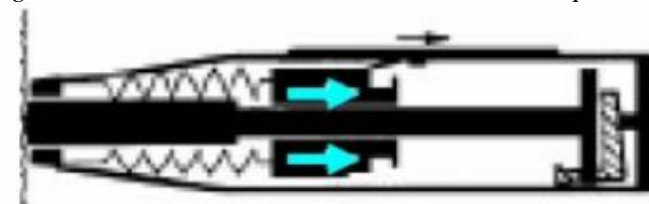
tecnológico nas últimas décadas, muitos deles, segundo Câmara (2008), continuam tendo o princípio do esclerômetro de Schmidt, desenvolvido em 1948 pelo engenheiro suíço Ernest Schmidt e nomeado de Schmidt Hammer. Na Figura 4, um exemplo do sistema massa-mola antes da colisão, na figura 5, depois da colisão.

Figura 4 - Sistema massa-mola do esclerômetro antes da colisão (Thomaz, 2007)



Fonte: Esclerômetro. Notas de aula do Instituto Militar de Engenharia, 2007

Figura 5 - Sistema massa-mola do esclerômetro após colisão



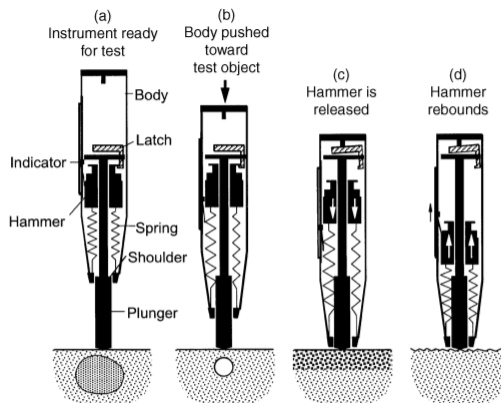
Fonte: Esclerômetro. Notas de aula do Instituto Militar de Engenharia, 2007

O método de ensaios consiste em provocar um choque entre um sistema massa-mola proveniente do esclerômetro contra a superfície cuja dureza se pretende mensurar. O rebote do sistema após a colisão depende da energia armazenada anterior ao choque, função da extensão e rigidez da mola, da energia absorvida na fricção dos elementos internos do aparelho e da energia absorvida pela superfície contra a qual o sistema colide.

De acordo com a NBR 7584:2012, quanto maior a energia absorvida pela superfície de colisão, menor é a parcela de energia que se converte em deformação permanente no local, de maneira que, havendo maior quantidade de energia para o retorno do sistema massa-mola, o rebote é maior. O resultado principal do ensaio é o chamado índice esclerométrico (IE), calculado em porcentagem pela relação de deslocamentos da mola após e antes do choque (Thomaz, 2007). Na Figura 6, os quatro principais momentos no ensaio esclerométrico. De (a) para (b), a mola é distendida, com armazenamento de energia potencial elástica. Em (c), o sistema é liberado e, por conseguinte, vai de encontro à superfície de colisão, momento em que já há perda de energia por fricção; após o choque, o sistema tem o rebote, isto é, caminha na direção contrária, mas sem

atingir a posição inicial mostrada em (b), justamente pelas perdas de energia ocasionadas durante o percurso e choque.

Figura 6 - Principais etapas do ensaio com esclerômetro



Fonte: ACI 228, 2003

O método do ensaio com esclerômetro pode ser utilizado para medir a homogeneidade do concreto, busca por singularidades como vazios de concretagem, dentre outros. Entretanto, sua maior utilidade se dá na medição de grandezas que estão, de alguma forma, correlacionadas com a dureza superficial do concreto, representada pelo principal parâmetro do ensaio, o índice esclerométrico. A resistência à compressão é a propriedade mais recorrente nesse contexto e, segundo Thomaz (2007), o ensaio é muitas vezes usado para aferir a resistência à compressão de partes da estrutura cujos corpos de prova representativos apresentaram resultado abaixo do esperado e para o caso de estruturas antigas.

Características que influenciam na dureza superficial da superfície ensaiada podem, por conseguinte, influenciar no ensaio esclerométrico. A seguir, listam-se os principais fatores que podem interferir nos resultados do ensaio.

- Homogeneidade do elemento ensaiado: em geral, no ensaio esclerométrico, são ensaiados diferentes pontos do elemento, conforme normas, tanto de cunho nacional como internacional, recomendam. Entretanto, no caso de os diferentes pontos do elemento apresentarem estruturas internas muito diferentes, o rebote do esclerômetro pode variar consideravelmente.
- Superfície de ensaio: como o ensaio busca aferir a dureza superficial, singularidades nessa região podem interferir nos resultados. A norma NBR

7584:2012 recomenda que as superfícies sejam limpas, secas e, preferencialmente, planas. Superfícies irregulares, ásperas, curvas ou talhadas devem ser evitadas. Ainda, segundo Bungey e Millard apud Sahuinco (2011), o índice esclerométrico, quando do ensaio em concretos plásticos, tende a ser menor para superfícies úmidas, chegando a diferenças da ordem de 20% em relação a superfícies secas.

- Método de fixação do elemento ensaiado: pelo próprio princípio do ensaio com esclerômetro, é razoável admitir que peças mal fixadas, sujeitas a vibrações, terão seus resultados de rebote influenciados por essa movimentação. Assim, a maioria das normas recomenda, ainda que de forma subjetiva, fixação adequada para cada situação.
- Proporção dos materiais na composição do concreto: para qualquer tipo de concreto, a proporção dos materiais constituintes exerce influência sobre suas propriedades mecânicas; segundo Teodoru apud Evangelista (2002), a dureza superficial também pode ser afetada, e, portanto, admite-se que pode haver influência nos resultados do ensaio esclerométrico.
- Direção do ensaio: segundo a norma NBR 7584:2012, devem ser evitados elementos de concreto com dimensão na direção do impacto do esclerômetro inferior a 100 mm, por faltar rigidez nessa direção, de modo que fenômenos dinâmicos podem influenciar nos resultados.

O método do ensaio esclerométrico tem como principais vantagens o custo relativamente baixo do equipamento, facilidade de manuseio e transporte, e rapidez de execução de ensaio. Entretanto, afere diretamente apenas a dureza superficial das peças ensaiadas, que como o nome sugere se refere à camada menos profunda desses elementos. Apesar disso, a resistência à compressão não é diretamente relacionada à superfície dos elementos, nem mesmo a sua dureza superficial, o que pode gerar baixa acurácia em correlações, conforme sugerem muitos estudos sobre o tema. Ainda, ressalta-se que para o caso específico de correlação da resistência à compressão de blocos de concreto com os resultados do ensaio esclerométrico, pouco material foi

encontrado na literatura estudada, o que de certa forma representa uma limitação ainda maior para a situação deste texto.

A norma brasileira regulamentadora do ensaio esclerométrico é a NBR 7854:2012, que traz as recomendações para boa execução do ensaio, como dimensões mínimas e condições propícias de fixação dos elementos ensaiados, além de fornecer metodologia para execução do relatório de ensaio. Ainda, a norma recomenda desconsideração de valores que estejam afastados em mais de 10% dos valores médios obtidos e estabelece como 5, o número mínimo de valores individuais para cálculo do índice esclerométrico.

2.4 Ultrassom

Ensaaios em engenharia civil utilizando a tecnologia do ultrassom começaram a ser executados por volta na década de 1970. (Câmara, 2008). Na Figura 7, um exemplo moderno de aparelho portátil para execução de ensaio não destrutivo com ultrassom.

Figura 7 - Exemplo de equipamento portátil de ultrassom



Fonte: <https://www.proceq.com/pt/coMPare/ensaios-de-velocidade-de-pulso-ultrassonico-avancado-e-de-pulso-eco/>

Quando um material sólido sofre um impulso mecânico, três tipos de onda são gerados, com diferentes características no que se refere ao modo de propagação, excitação do meio e velocidade. As ondas primárias, conhecidas por ondas P, oscilam as partículas na mesma direção de sua propagação, o que acaba por gerar tensões normais, de tração e compressão, no meio oscilante. As ondas secundárias, conhecidas por ondas S, oscilam as partículas em direção ortogonal àquela de sua propagação, o que acaba por gerar tensões de cisalhamento no meio oscilante. Finalmente, há as ondas de superfície, conhecidas por ondas de Rayleigh, que se propagam na parte mais superficial dos objetos, com movimentação elíptica das partículas. As ondas primárias, conforme nome sugere, têm velocidade superior às dos outros dois tipos e, por esse

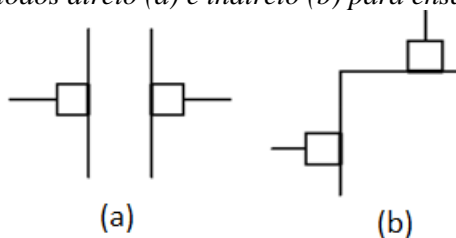
motivo, são as principais geradas pelos equipamentos de ultrassom para ensaios não destrutivos e nelas em que o método se baseia (Meneghetti apud Andrade, 2007).

Há três principais tipos de execução do ensaio em ultrassom: métodos direto, semi-direto e indireto, em que todos os três, de diferentes formas, têm o mesmo objetivo. Através de dois transdutores, um emissor e um receptor de pulsos ultrassônicos, os três métodos citados buscam medir o tempo de percurso do pulso, o que permite, através do conhecimento das distâncias percorridas pela onda, o cálculo de sua velocidade de propagação. As três possibilidades de medição são ilustradas na Figura 8 e 9.

Na transmissão direta, os dois transdutores do equipamento, o de emissão e o de recepção, são posicionados em duas faces opostas da peça ensaiada, ou seja, são “atravessados” pela peça, de maneira que o pulso ultrassônico percorre o caminho mais curto até o receptor, o que acaba por gerar, segundo Nepomuceno (1999), maior precisão na medição.

Na transmissão semi-direta, os dois transdutores são posicionados em duas faces não paralelas. Desde que a distância entre os transdutores não seja muito grande, o método pode fornecer bons resultados.

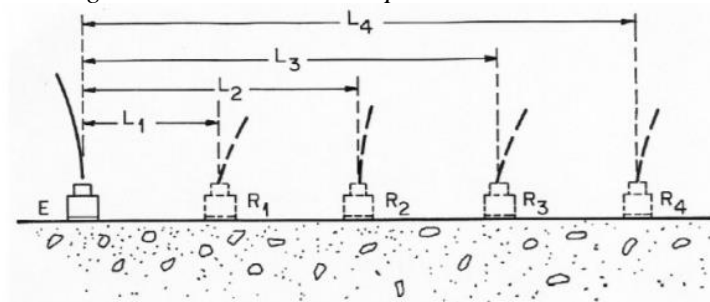
Figura 8 - Métodos direto (a) e indireto (b) para ensaio em ultrassom



Fonte: Nepomuceno, 1999

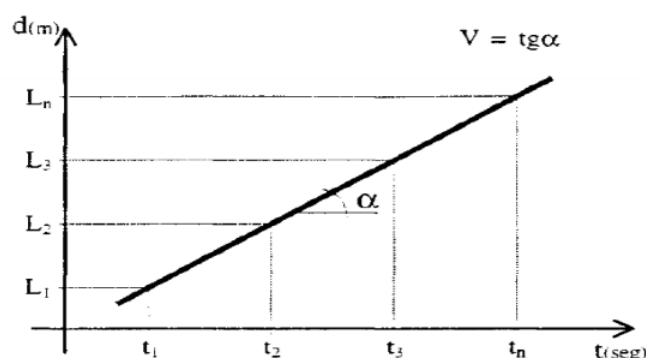
Na transmissão indireta, ilustrada na figura 9, os transdutores são posicionados na mesma face e, segundo Sahuinco (2011), há muitas incertezas na medição da distância percorrida pela onda, nesse caso. De fato, conforme procedimentos na norma NBR 8802:2019, o ideal é que sejam feitos diversos posicionamentos para o transdutor receptor e consequentemente diversas medições, a velocidade deverá ser calculada pela tangente da reta resultante dos valores encontrados para distância e tempo de percurso do pulso, conforme Figura 10.

Figura 9 - Método indireto para ensaio em ultrassom



Fonte: NBR 8802:1994

Figura 10 - Reta de distância x comprimento para cálculo da velocidade do pulso através do método indireto



Fonte: NBR 8802:1994

A experiência do ensaio em ultrassom mostra que os três métodos de ensaio podem ser úteis, mas o aparecimento de algumas incertezas quando do uso dos métodos semi-indireto e indireto sugerem a preferência pelo método direto. Entretanto, é comum que o método direto não possa ser realizado quando o elemento ensaiado não permite posicionamento dos transdutores em faces opostas, como de fato acontece, por exemplo, em alvenarias ou lajes de edifícios. Assim, o método indireto acaba por ser, em diversas situações, o único possível, justamente por permitir que os transdutores estejam na mesma face; alguns autores sugerem que não se perde tanta confiança quando da execução do ensaio pelo método indireto: segundo Sahuinco (2011), a norma BS 1881 (1986) indica que a diferença entre os resultados dos métodos direto e indireto é próxima a 3%. Similarmente, citando uma pesquisa de comparações entre esses dois métodos para o caso de lajes com propriedades uniformes, Evangelista (2002) sugere que as medições são estatisticamente similares. A velocidade de propagação de um pulso ultrassônico em certo material está relacionada às suas características elásticas e de densidade, como mostra a equação 1 (Bungey, apud Câmara, 2008).

$$V = \frac{KE_d}{\rho} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

$$k = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

Com:

V = Velocidade da onda

E_d = Módulo de elasticidade dinâmico

ρ = Massa específica

ν = Coeficiente de Poisson

Assim, qualquer grandeza que esteja, de alguma forma, correlacionada com uma daquelas contidas na equação 1, pode ser associada à velocidade de propagação da onda ultrassônica, daí a grande utilidade do método. Algumas grandezas, como módulo de elasticidade dinâmico, importante para caracterização para estruturas sob carregamento dinâmico como aquelas sujeitas a excitação sísmica, já incorporaram o ultrassom para seu tratamento. Ainda, há um grande desenvolvimento do uso do ensaio ultrassom para verificação da conformidade dos materiais, uma vez que fissuras ou pequenos defeitos internos acabam por interferir na massa específica e rigidez locais, motivo pelo qual essas singularidades podem ser identificadas pelo resultado do ensaio. Segundo a NBR 8802:2019, as aplicações do ensaio são:

- Estimar a profundidade de fissuras e outras imperfeições
- Monitorar a variação de propriedades do concreto ao longo do tempo
- Determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto, por meio das ondas longitudinais e/ou transversais
- Avaliar a resistência à compressão do concreto, mediante estabelecimento de curva de correlação obtida a partir de ensaios realizados conforme a ABNT

NBR 5739 e por este método, com o mesmo concreto e com tratamento estatístico adequado.

Ainda, ressalta-se que conhecer as principais variáveis que influenciam na velocidade medida do pulso ultrassônico é fundamental não só para a análise dos resultados, mas também para a identificação e justificativa de possíveis anomalias. Listam-se a seguir os principais fatores intervenientes no resultado do ensaio.

- Superfície de contato: a região de contato com os transdutores deve ser capaz de propiciar condições adequadas para emissão e recepção dos pulsos; possíveis singularidades nessas regiões podem interferir no caminho percorrido pela onda, o que certamente interfere nos resultados.
- Proporção dos materiais na composição do concreto: para concreto plástico, Sturup *et al.* (1984) chegou a resultados em que, para maiores relações água/cimento, para uma mesma velocidade medida, a resistência à compressão era menor; ou seja, a curva de correlação variava conforme a quantidade de cimento empregada na mistura. Ainda, diferentes proporções de materiais na composição do concreto podem levar a diferentes características elásticas e de massa específica do material, o que pode, segundo equação 1, influenciar na velocidade medida no ensaio de ultrassom.
- Homogeneidade do material: conforme equação 1, a velocidade medida no ensaio ultrassônico está relacionada à densidade e propriedades elásticas do material; no caso de peças heterogêneas, essas grandezas podem ser função do local do ensaio, ou seja, podem ter pouca representatividade sobre as condições médias do material, o que pode levar a resultados de caráter local, e não global.
- Teor de umidade: segundo Naik apud Câmara (2008), a velocidade do pulso ultrassônico aumenta para concretos em condições de maior umidade, e diminui com o aumento da resistência à compressão. Dessa forma, com o aumento da umidade, os resultados do ensaio ultrassônico tendem a superestimar a resistência à compressão, o que deve ser considerado quando da análise dos resultados.

- Temperatura: segundo Malhotra e Carino apud Sahuinco (2004), para temperaturas entre 5 e 30°C, não há mudança significativa na velocidade do pulso ultrassônico, para temperaturas fora desse intervalo, pode haver grande variação.

O ensaio de ultrassom apresenta como uma das principais vantagens o fato de ser pouco, ou nada intrusivo, ou seja, além de não destrutivo, tem pouca ou nenhuma interferência na integridade da peça ensaiada. O equipamento é leve, portátil, e de custo não consideravelmente alto, o que favorece sua utilização. Entretanto, conforme sugere Phoon et al apud Evangelista (2002), não há correlação única entre a resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico, havendo inúmeros outros fatores intervenientes, como proporção dos materiais presentes no concreto, teor de umidade, condições de superfície, o que precisa ser considerado quando da análise dos resultados dos ensaios. Ainda, nota-se que grande parte dos estudos de correlação de velocidade do ensaio ultrassom com resistência à compressão tem maior enfoque no concreto plástico, em geral utilizados em elementos de concreto armado. Para o concreto utilizado para fabricação de blocos de concreto, de caráter seco, o estudo é ainda incipiente, de maneira que não se sabe de forma precisa se os fenômenos observados no concreto plástico se mantêm.

Alguns trabalhos brasileiros neste âmbito, como de Melo (2016), estudaram o comportamento dos ensaios de ultrassom para alvenaria estrutural e chegaram a resultados de mesma ordem de grandeza em relação àqueles normalmente obtidos com concretos plásticos, nos quais a velocidade do pulso ultrassônico é da ordem de algumas unidades de km/s; entretanto, os desvios de medição da velocidade ultrassônica parece variar de forma mais significativa para os blocos, de forma que há que se propor de forma cuidadosa uma metodologia que contemple essas incertezas.

O ensaio de ultrassom em concreto é regulamentado no Brasil pela norma NBR 8802:2019. Essa norma traz as recomendações sobre os procedimentos básicos do ensaio, como metodologia para posicionamento dos transdutores, preparo da superfície da peça e medição de umidade do elemento estrutural. Recomenda ainda, formatação básica do relatório do ensaio, que deve contar com posição relativa dos transdutores,

identificação dos corpos de prova e, no caso de testemunhos extraídos diretamente da estrutura, com a posição exata de sua extração.

2.5 Curvas de correlação

Sendo o objetivo último deste trabalho o estudo da correlação das variáveis do índice esclerométrico e velocidade do pulso ultrassônico com a resistência característica dos blocos de concreto, a seguir são resumidamente apresentados os principais resultados encontrados na literatura e que servirão de balizamento para o prosseguimento deste texto.

Tratando-se especificamente do concreto plástico, muitos autores foram capazes de, por meio de regressão de resultados laboratoriais de ensaios de compressão em prismas de concreto, estabelecer propostas de funções correlacionando o índice esclerométrico com a resistência à compressão desses prismas. Evangelista (2002) sumariza as funções mais comumente empregadas, bem como devidos autores, na seguinte Tabela 3:

Tabela 3 – Funções empregadas na correlação de resistência à compressão x índice esclerométrico para concreto plástico

Autor	Equação*	f_c (MPa)	Corpo de prova	Tipo de agregado	OBS
Ravindrajah e Tam(1988)	$f_c = 7,25e^{0,08IE}$	15,0 a 75,0	Cubo 100mm	granito ($D_{\max}=20\text{mm}$)	
Almeida (1993)	$f_c = 1,0407IE^{1,1546}$ $f_c = 1,041IE^{1,155}$	40,1 a 120,3	Cubo 150mm	granito ($D_{\max}=25\text{mm}$)	1ª e 2ª etapas de ensaio
Gonçalves (1995)	$f_c = 1,73IE - 34,3$	18,0 a 42,0	Testemunho 70mmx70mm	-	Idade – 28 dias a 3 meses
Pascale et al (2000)	$f_c = 0,000135IE^{3,4424}$	30,0 a 150,0	Cubo 150mm	Calcário ($D_{\max}=15\text{mm}$)	
Qasrawi (2000)	$f_c = 1,353IE - 17,393$	6,0 a 42,0	Cubo 150mm	diversos	
Soshiroda e Voraputhaporn (1999)	$f_{c28} = 1,61IE_3 - 1,37$ $f_{c28} = 1,47IE_{28} - 16,85$	20,0 a 65,0	Cubo 150mm	Seixo	IE ₃ —em 3 dias IE ₂₈ —aos 28 dias
Proceq-Digi Schimdt	$f_{c7} = 1,4553IE_7 - 22,817$ $f_{c14-56} = 1,398IE_{14-56} - 20,171$	25,1 a 33,1	Cubo 200mm	Seixo ($D_{\max}=32\text{mm}$)	7 dias 14 dias a 56 dias.
Lima e Silva (2000)	$f_c = 0,0501IE^{1,8428}$	25,1 a 33,1	Cilindro	brita 0 e brita 1	

Fonte: Evangelista, 2002

Nota-se, pois, predominância de funções dos tipos exponencial e potência, com presença, em menor grau, de simples regressões lineares; ademais, ressalte-se que várias dessas funções são propostas para tipos específicos de agregados, com diâmetro máximo

especificado, o que sugere, como pode ser suposto, que os materiais empregados no concreto interferem no grau e tipo de correlação entre essas variáveis.

Considerando o ultrassom, o interesse da comunidade científica em correlacionar a resistência à compressão com a velocidade do pulso ultrassônico é crescente, e diversos estudos já foram publicados, principalmente tratando do concreto plástico, diferentemente deste texto. Em geral, o principal método de aferir os resultados, ou seja, o grau de correlação entre a resistência à compressão e a velocidade do ensaio em ultrassom, é a partir do coeficiente de determinação, comumente expresso por r^2 , grandeza capaz de indicar quão próximas as curvas são. Segundo Almeida (1993), uma maneira de interpretar o valor do coeficiente de determinação é aquela contida na Tabela 4.

Tabela 4 - Avaliação do coeficiente de determinação (Almeida, 1993)

Valores de R^2	Classificação
1,00 a 0,81	Bom
0,80 a 0,50	Razoável
0,49 a 0,25	Baixo
0,24 a 0,00	Muito Baixo

Fonte: Almeida, 1993

No que se refere ao concreto plástico, muitos pesquisadores conseguiram coeficientes de determinação classificados como razoáveis e até bons. Evangelista (2002), por exemplo, com utilização de funções exponenciais, chegou em coeficientes de determinação de 0,96 para alguns dos diversos traços ensaiados; Câmara (2008) chegou a valores similares com funções exponenciais, além de ter obtido resultado inferior, porém de classificação “boa” segundo tabela 3, para funções exponenciais.

Ainda, considerando que tanto o índice esclerométrico como a velocidade do pulso ultrassônico têm grandes limitações no que se refere a sua capacidade para, de maneira isolada, explicar a resistência à compressão em concretos, muitos pesquisadores começaram a estudar correlações da resistência com ambas as variáveis na esperança de que o coeficiente de determinação das funções de correlação aumentasse. Tanigawa et al apud Evangelista (2002), propuseram funções lineares para estabelecer tal correlação:

$$f_c = a + b.IE + c.V \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

f_c = Resistência à compressão

IE : Índice esclerométrico

V : velocidade do pulso ultrassônico

a, b, c = constantes

Já Almeida (1993) encontrou altos coeficientes de correlação com funções significativamente diferentes, do seguinte tipo:

$$IE = e^a \cdot f_c^b \cdot V^c \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

f_c = Resistência à compressão

IE : Índice esclerométrico

V : velocidade do pulso ultrassônico

a, b, c = constantes

Em todo caso, os coeficientes de determinação tendem a aumentar quando da consideração conjunta do índice esclerométrico e velocidade do pulso ultrassônico, o que justifica, no mínimo, a tentativa para a consideração simultânea dessas variáveis. Para o presente trabalho, com o caso específico de blocos de concreto, funções de correlação dos tipos mostrados acima serão testadas, não excluindo a possibilidade do estudo de aplicação de funções de outros tipos, como polinomiais, de potência, etc.

Melo (2016) conseguiu satisfatórios coeficientes de correlação linear, alcançando $r^2 = 0,95$, ainda que os dados com comportamento “outlier”, ou seja, atípicos, fossem excluídos, representando alguns dos principais dados brasileiros disponíveis na literatura, valores esses que serão comparados aos resultados deste trabalho

3. METODOLOGIA

Apresentam-se a seguir a metodologia geral utilizada para realização dos ensaios de ultrassom e dureza superficial nos blocos vazado de concreto de alvenaria, assim como seus respectivos procedimentos e instrumentos. Por fim, se discutirá a análise estatística a ser empregada na análise dos resultados.

3.1 Grupos de resistência

O programa experimental adotará blocos de três grupos de resistência características à compressão, sendo eles de 4,5 MPa, 6 MPa e 16 MPa. Ressalta-se que os blocos de 4,5 MPa são, na verdade, referentes à classe de 4,0 MPa, que tradicionalmente é citada nas normais mais recentes. Utilizou-se a denominação de 4,5 MPa simplesmente porque os blocos vieram marcados com esses valores, de forma que se manteve a nomenclatura para evitar confusão no laboratório. Estes valores respeitam o critério de mínima resistência à compressão de 3 MPa, para o bloco ser considerado com função estrutural, definido pela norma NBR 6136:2014. Os grupos de resistência distintos permitirão verificar se as correlações obtidas se mantêm ao variar a resistência à compressão. Além disso com um dos grupos sendo de classe C (4,5 MPa), também será possível verificar a tendência de comportamento destas classes distintas. Todos os blocos são da família 15 x 40, tendo dimensões nominais de 140 mm x 190 mm x 390 mm.

3.2 Caracterização dos blocos

As dimensões relevantes foram medidas através de um paquímetro, de acordo com a norma NBR 12118:2013. Dessa maneira, para obterem-se as dimensões da altura, largura e comprimento, foram realizadas três determinações em pontos distintos na face de maior espessura das paredes dos blocos, calculando-se a média como resultado. Para determinação das espessuras dos septos do bloco, foram realizadas duas medidas em cada parede para os septos longitudinais e uma para os septos transversais. A espessura mínima das paredes é a média desses valores. Os resultados das medidas de altura, largura, comprimento e espessura são mostrados na Tabela 5.

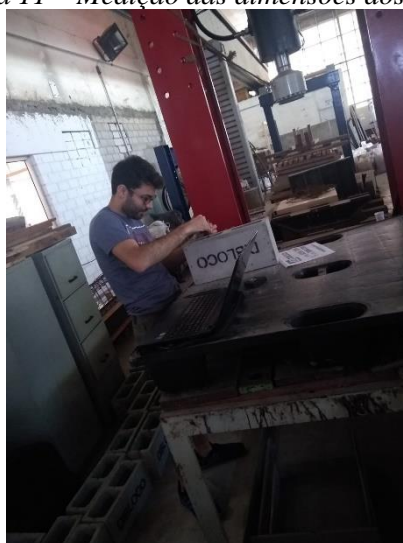
Tabela 5 – Medições das dimensões dos blocos

Classe de resistência	Bloco	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura Long. min	Espessura Trans. min
4,5 MPa	12	140,63	191,59	387	19,20	19,53
	11	140,19	190,13	387	19,94	18,96
	10	140,51	191,91	390	19,77	18,70
	9	140,24	191,24	388	19,49	19,24
	8	139,94	192,66	388	19,88	18,58
	7	139,69	192,15	389	19,89	19,06
	6	140,78	192,39	389	19,40	19,19
	5	139,02	191,7	389	19,27	18,66
6 MPa	4	140,93	191,7	391	20,10	19,77
	12	140,12	190,74	390	24,73	25,85
	11	140,25	191,83	389	24,43	26,68
	10	139,98	190,6	390	24,88	26,59
	9	140,34	192,32	391	24,56	26,18
	8	140,56	190,58	392	24,91	26,78
	7	139,88	190,48	392	24,91	26,34
	6	140,76	191,42	392	24,89	25,88
16 MPa	5	139,93	191,47	391	24,45	25,77
	4	130,63	191,51	391	24,8	26,80
	12	141,03	191,36	393	24,82	26,39
	11	140,7	190,13	393	26,03	26,63
	10	139,86	190,49	390	24,16	25,78
	9	140,22	190,58	391	25,68	26,68
	8	140,55	188,8	392	25,60	26,22
	7	139,64	186,86	392	25,62	26,30
	6	140,81	190,19	392	24,59	26,24
	5	141,13	191,51	391	24,96	26,10
	4	140,99	189,2	392	24,78	26,86

Fonte: Elaboração própria

Analisando a Tabela 5, notou-se pequena variabilidade nas dimensões de blocos da mesma classe, sugerindo a pequena interferência que esta variação poderia causar nos ensaios.

Figura 11 – Medição das dimensões dos blocos



Outra caracterização realizada foi a pesagem dos blocos. Para isso, eles foram levados a uma estufa com temperatura de aproximadamente 105 °C, onde foram mantidos por 24 h. No dia seguinte, os blocos foram retirados e pesados, de forma a determinar sua massa seca, conforme procedimentos da NBR 12118:2013. Os resultados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Medições dos pesos dos blocos

Classe de resistência	Bloco	Peso (Kg)
4,5 MPa	12	10,10
	11	9,80
	10	10,00
	9	9,90
	8	9,95
	7	9,80
	6	10,00
	5	9,80
6 MPa	4	10,05
	12	11,80
	11	12,00
	10	11,95
	9	12,15
	8	12,10
	7	12,10
	6	11,40
16 MPa	5	12,05
	4	10,90
	12	13,30
	11	13,80
	10	13,20
	9	13,85
	8	13,80
	7	13,50
	6	13,35
	5	13,35
	4	13,45

Fonte: Elaboração própria

Figura 12 – Blocos na estufa



3.3 Ensaios não destrutivos

Foram utilizados seis blocos de cada resistência, deixando-se mais três blocos de cada resistência como reserva. A definição da quantidade de blocos foi por meio da norma NBR 6136:2014. Nela é definido que a quantidade mínima de blocos para ensaio dimensional e resistência à compressão axial é de seis blocos para um lote se até cinco mil blocos, quando não há valor conhecido do desvio-padrão da fábrica. Os blocos utilizados nos ensaios podem ser vistos na Figura 13

Figura 13 – Blocos de 4,5 MPa, 6 MPa e 16 MPa



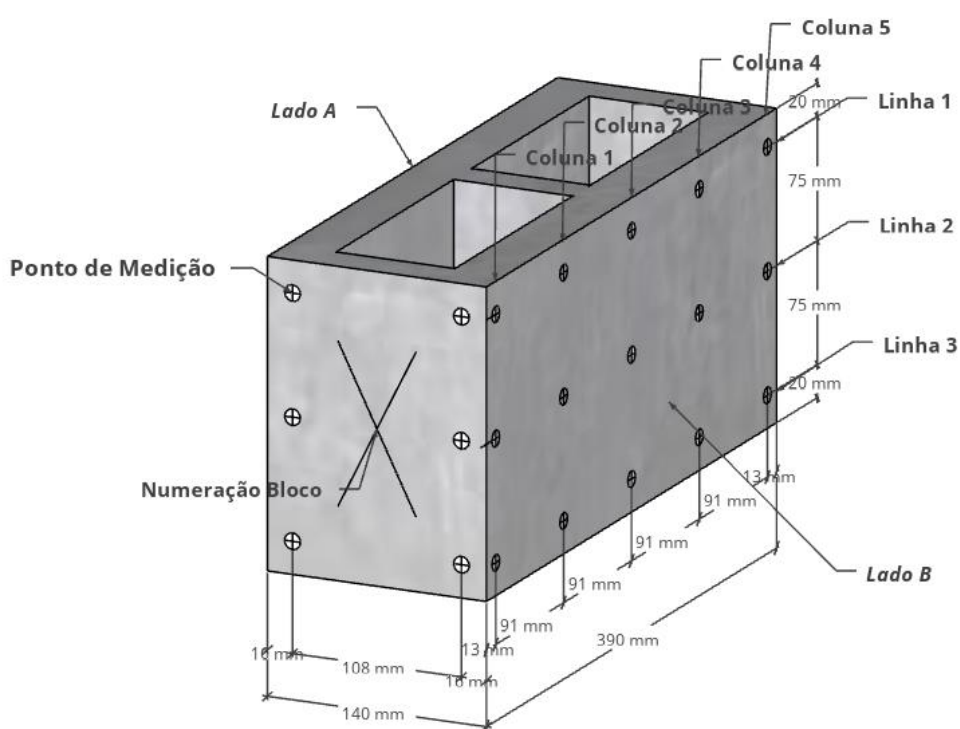
Dividiu-se o programa experimental em 4 etapas, chamadas de Fase 1, Fase 2, Fase 3 e Fase 4. Três blocos foram analisados na Fase 1 (bloco 10, 11 e 12) e mais três na Fase 2 (bloco 7, 8 e 9). Na Fase 3 realizaram-se ensaios de ultrassom com carregamento nos seis blocos, finalizando-se com o ensaio destrutivo dos seis blocos na Fase 4.

Na Fase 1, os blocos foram ensaiados em um conjunto de 42 pontos referenciados de medição para determinação da velocidade de pulso ultrassônico; em outros 30 pontos realizaram-se os ensaios de dureza superficial. 30 pontos estão localizados nas paredes longitudinais, sendo 15 pontos em cada face externa (denominadas de Lado A e Lado B, tendo como referência a marcação da numeração do bloco). Os pontos estão dispostos em três linhas horizontais chamadas de Linha 1, Linha 2 e Linha 3, sendo que a Linha 1 refere-se à região com as paredes menos espessas (parte mais alta do bloco - topo); a Linha 2 refere-se à linha central do bloco e a Linha 3 refere-se à linha com as paredes mais espessas (parte mais baixa do bloco - base). Além das linhas, existem cinco colunas verticais chamadas Coluna 1, Coluna 2, Coluna 3, Coluna 4 e Coluna 5, sendo a Coluna 1 a mais próxima à numeração do bloco e a Coluna 5 a mais distante. Todos estão

dispostos simetricamente em relação ao eixo de simetria transversal e numerados algebricamente de acordo com o ensaio (Figura 14). Estes pontos foram utilizados para o ensaio de dureza superficial e ultrassom direto e indireto.

Os 12 pontos restantes estão localizados nas duas faces de menor dimensão dos blocos (190 mm nominais), sendo 6 pontos em cada face separados em duas colunas (Figura 14). Os pontos foram utilizados como medição apenas como parte do ensaio de ultrassom direto, no qual medidas das paredes longitudinais dos blocos foram realizadas.

Figura 14 – Disposição dos pontos no bloco e outras informações



Fonte: Elaboração própria

Estes pontos foram escolhidos visando obter resultados em todas as regiões de maior interesse, como paredes e septos longitudinais. Decidiu-se por não realizar medições de ultrassonografia indireta nas faces de menor dimensão, visto que neste método os transdutores devem estar espaçados na mesma face. Nesse caso, a pequena dimensão da face menor geraria problemas de medição, podendo atrapalhar os resultados. A falta de espaçamento entre os possíveis pontos também é a razão de não terem sido realizados ensaios de dureza superficial nas faces de menor dimensão.

3.3.1 Dureza superficial

A avaliação de dureza superficial dos blocos foi realizada com um esclerômetro de reflexão. O procedimento adotado para este ensaio foi uma adaptação daquele constante na norma NBR 7584:2012.

A instrumentação é composta pelo esclerômetro de reflexão, a bigorna de aço e o disco ou prisma de carborundum para polimento manual da área de ensaio. Seus parâmetros são definidos pela norma NBR 7584:2012 como:

- Esclerômetro de reflexão: consiste fundamentalmente de uma massa-martelo que, impulsionada por uma mola, se choca, através de uma haste, com ponta em forma de calota esférica, com a área de ensaio, conforme item de revisão bibliográfica deste relatório.
- Bigorna de aço: dotada de guia de aço, com massa aproximada de 16 kg, colocada sobre base rígida e nivelada, sendo que a superfície destinada ao impacto deve apresentar dureza Brinell de 5 000 MPa e fornecer índices esclerométricos de 8.

Os esclerômetros de reflexão são divididos em diferentes tipos em função das características da estrutura de concreto e grau de precisão desejado. Cada tipo possui uma energia de percussão diferente, podendo ser de 30 N.m, 2,25 N.m, 0,90 N.m e 0,75 N.m. O aparelho utilizado para realização dos ensaios deste trabalho foi o SilverSchmidt & Hammerlink da Proceq, possuindo uma energia de percussão de 0,75 N.m, ideal para medição de resistências baixas.

Figura 15 – Esclerômetro SilverSchmidt & Hammerlink da Proceq



Fonte: manual do equipamento

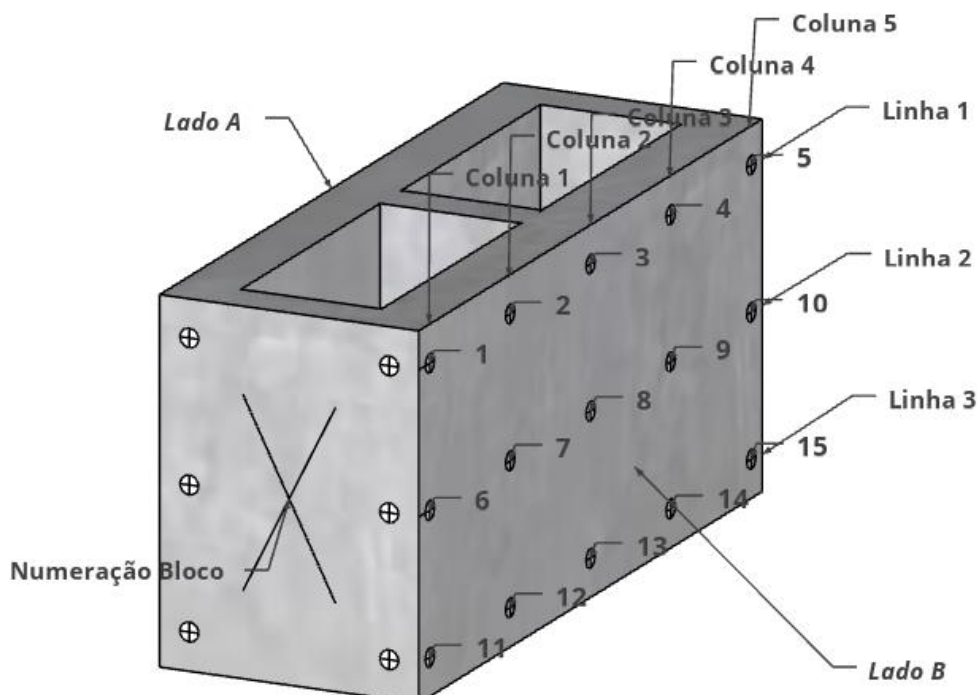
O procedimento para realização do ensaio foi iniciado por uma verificação do esclerômetro, sendo aferido antes de sua utilização ou a cada 300 impactos na mesma inspeção. Para isso, efetuaram-se pelo menos 10 impactos sobre a bigorna e verificou-se que os índices esclerométrico médios e individuais cumpriam os requisitos da norma. Após a verificação do esclerômetro, foi preparada a superfície do bloco, devendo estar lisa e limpa. Com o aparelho e a superfície verificados, as medições foram realizadas nos pontos previamente referenciados, respeitando-se a distância mínima de 30 mm entre os pontos de impacto.

Foram realizadas 15 medições (pontos de impacto) em cada face externa do bloco, totalizando 30 medições por bloco. Estas medições foram feitas nos 30 pontos referenciados das faces externas, numerados de 1 a 15 para cada lado (Figura 16), considerando toda a face do bloco como a área de ensaio. Ressalta-se que alguns critérios definidos pela norma não foram cumpridos rigorosamente, como a distância mínima para arestas e área de ensaio. Isto porque a norma refere-se ao ensaio realizado em concreto plástico e não em blocos de alvenaria estrutural.

Nesta adaptação foi considerado um índice esclerométrico IE para cada bloco, calculado através da média dos índices esclerométricos das duas faces medidas, que por sua vez foram determinados pela média dos 15 pontos de impacto. Uma outra adaptação necessária foi a de considerar todos os impactos no cálculo do IE, ao contrário da norma que descarta valores distantes de 10% ou mais da média. Isto se deu pois o bloco, por

possuir furos em sua geometria, ficam com rigidez muito variável. Sendo assim, praticamente todos os pontos seriam descartados caso a recomendação fosse seguida.

Figura 16 – Disposição e numeração dos pontos de medição para dureza superficial



Fonte: Elaboração própria

3.3.2 Velocidade de pulso ultrassônico

O outro ensaio não destrutivo realizado na Fase 1 foi de ultrassonografia. O procedimento adotado para a execução deste ensaio foi uma adaptação daquele constante na norma NBR 8802:2019.

A instrumentação é composta de: circuito gerador-receptor, transdutor-emissor, transdutor-receptor, circuito medidor de tempo, cabos coaxiais e barra de referência. Seus parâmetros são definidos pela norma NBR 8802:2019 como:

- Circuito gerador-receptor: aparelho de pulso elétrico de baixa frequência ultrassônica, com alta estabilidade e precisão de leitura de pelo menos 0,1µs.
- Transdutor-emissor: aparelho que possibilita a transformação do pulso elétrico em onda de choque numa faixa de 24 kHz a 500 kHz.

- Transdutor-receptor: aparelho que possibilita a transformação da onda de choque em pulso elétrico, com amplificação adequada ao circuito do gerador-receptor.
- Circuito medidor de tempo: aparelho que possibilita medir o tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção. Este circuito pode ser provido de um ajuste para descontar o tempo gasto nos cabos conectores entre o gerador-receptor e os transdutores. O tempo gasto no percurso pode ser lido em um tubo de raios catódicos ou em um mostrador digital.
- Cabos coaxiais: cabos que devem permitir a conexão perfeita dos transdutores ao circuito gerador-receptor.
- Barra de referência: dispositivo que possibilita a aferição do equipamento ultrassônico, com superfícies de acoplamento com acabamento polido e tempo de trânsito gravado.

Para realização dos ensaios, utilizou-se o equipamento Pundit da marca Proceq, que foi configurado com uma frequência nominal de 24 kHz.

Figura 17 – Ultrassom Pundit da Proceq



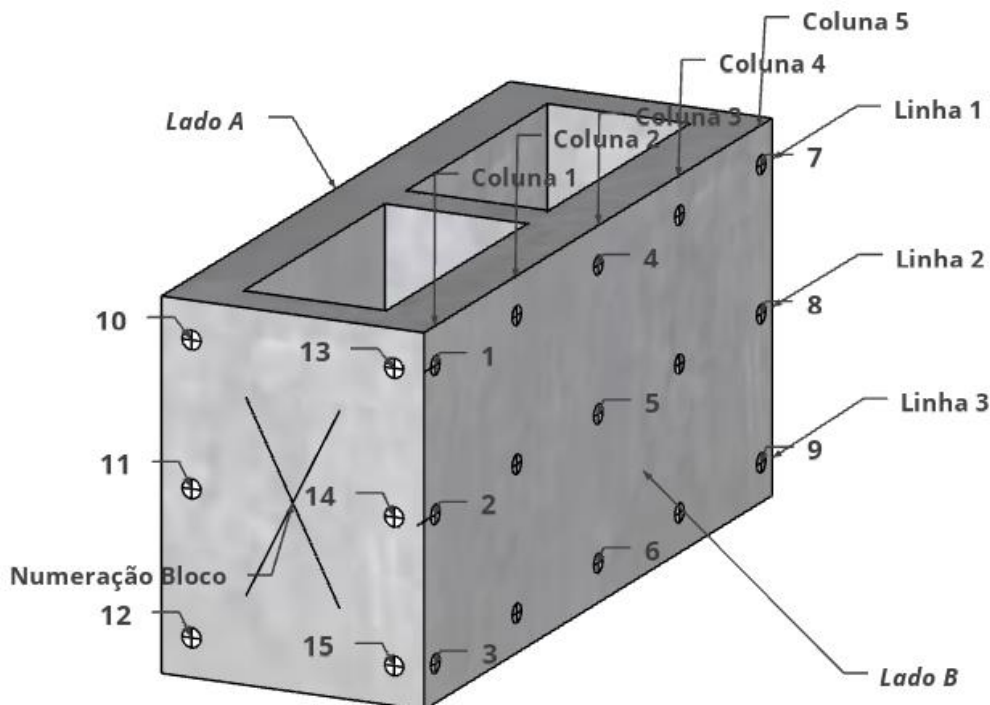
Fonte: manual do equipamento

A sequência de operações propostas para o ensaio de ultrassom nos blocos vazados de concreto foram: preparação do aparelho, através da montagem de seus componentes;

calibração do aparelho através da barra de referência; preparo da superfície dos blocos, verificando se suas superfícies estão lisas e limpas; posicionamento dos transdutores nos pontos referenciados do bloco ilustrados na Figura 18, de acordo com o tipo de ensaio (transmissão direta ou indireta). Antes do posicionamento dos transdutores aplicou-se uma fina camada de gel acoplante nas suas faces e na superfície do bloco, garantindo a transmissão das ondas. Por fim, foi realizada a medição do tempo que a onda levou para percorrer as posições relativas entre os transdutores.

No caso da transmissão direta, os transdutores foram colocados em faces opostas do bloco, onde foram realizadas 15 medições, sendo 9 medições nos septos transversais das faces longitudinais (1 a 9) e 6 nas faces transversais (10 a 15). Já na transmissão indireta, os transdutores foram colocados na mesma face do bloco, mantendo-se o emissor fixo em um ponto enquanto desloca-se o receptor para os demais pontos. Dividiram-se as medições em horizontal e vertical, sendo que no processo horizontal 24 medições foram realizadas, enquanto no processo vertical foram 20 medições.

Figura 18 – Disposição e numeração dos pontos de medição para ultrassom



Fonte: Elaboração própria

Figura 19 – Realização de ensaio de ultrassom indireto



O objetivo da Fase 1 do estudo foi obter medições em todo o bloco de forma detalhada, ou seja, ter resultados dos ensaios em diversas regiões e analisar as modificações que, porventura, fossem encontradas. Assim, buscou-se caracterizar as variações com o local de execução da medição e tipo de ensaio, além de estudado em que pontos os resultados possuem valores muito próximos e em que pontos eles são discrepantes. Ao final do estudo deste grupo, foi determinado quais os pontos de medição necessários para obter resultados satisfatórios na Fase 2, chamados de pontos de interesse. Assim, os 5 pontos da Linha 2 e os 3 pontos da Coluna 3 foram os pontos de interesse para os ensaios de ultrassonografia direta e indireta. Para o ensaio de dureza superficial, decidiu-se manter todos os pontos da Fase 1

Na fase 2, realizaram-se os mesmos ensaios para os outros três blocos (bloco 7, 8 e 9), onde dessa vez os pontos de medição foram os pontos de interesse determinados ao final da Fase 1. Dessa maneira, seis blocos foram analisados pelos ensaios de dureza superficial e ultrassonografia;

3.4 Ensaios de ultrassom com carregamento

Estes ensaios caracterizam a Fase 3, quando os ensaios para determinação da velocidade do pulso ultrassônico foram realizados nos blocos sob carga de compressão em dois níveis distintos: $30\% f_b$ e $70\% f_b$. Os pontos de ensaio são aqueles definidos para a Fase 2.

Estes ensaios visam o estudo do comportamento do bloco para diferentes níveis de carregamento, procurando saber se as cargas de compressão são relevantes no estudo de correlação.

Figura 20 – Realização de ensaio de ultrassom indireto com pré carga



Vale ressaltar que o ensaio de dureza superficial também foi previsto, mas no decorrer dos ensaios, decidiu-se por não o realizar. Isto se deu pois houve falta de disponibilidade do esclerômetro do laboratório para realização dos ensaios e, provavelmente pela falta de tempo para essa execução.

3.5 Ensaios de resistência à compressão

A máquina de ensaios para aplicação da força de compressão foi a Shimadzu modelo UH-200A, do Departamento de Construção Civil (PCC) da Escola Politécnica da USP, equipada com dois pratos de apoio de aço, um dos quais articulados, que atuam na face superior do bloco.

Este ensaio foi realizado de acordo com as diretrizes da NBR 12118:2013, com uma velocidade de aplicação de carga de 4 kN/s para os blocos.

Antes da realização dos ensaios, foi realizado a retífica das faces superior e inferior dos blocos de maneira a garantir a distribuição da carga uniformemente em toda a superfície.

Os ensaios foram realizados em 6 blocos de cada grupo de resistência, sendo que, em dois deles foram instalados 4 extensômetros elétricos de resistência, dois em cada face (um posicionado na vertical e outro na horizontal), para a medição das deformações longitudinais e transversais.

Figura 21 – Croqui do posicionamento dos extensômetros em um lado do bloco – extensômetro vertical (azul) e extensômetro horizontal (vermelho)

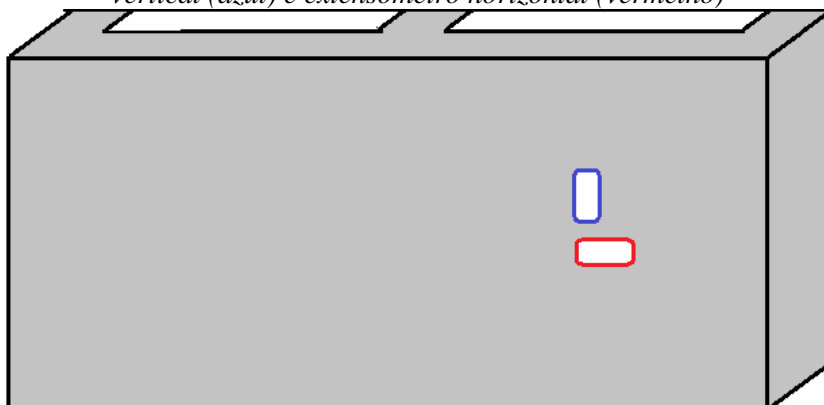


Figura 22 – Posicionamento dos extensômetros no Lado A do bloco



Figura 23 – Posicionamento dos extensômetros no Lado B do bloco



O ensaio de cada bloco iniciou-se e prosseguiu com velocidade constante até se atingir o primeiro patamar de carregamento para a realização dos ensaios de ultrassom; em seguida, prosseguiu-se até o segundo patamar de carregamento e, após a conclusão do ensaio, o bloco foi levado à ruptura.

Dois aspectos devem ser destacados:

- 1) Os valores de resistência do bloco foram bem superiores ao especificado pelo fabricante e, por isso, em alguns casos, a carga de 30% f_b e 70% f_b , calculadas antes do ensaio, não corresponderam a realidade; Sempre que possível, esse cálculo foi refeito e aplicado no ensaio seguinte;
- 2) Ao se parar o carregamento nos patamares previamente definidos, observou-se que havia uma perda de carga em função do mau funcionamento da máquina, ou seja, os ensaios de ultrassom eram realizados em patamares menores que o previsto; Em alguns casos, optou-se por ajustar essa carga durante os ensaios de ultrassom para que as diferenças de carregamento não fosse significativas.

Figura 24 – Bloco 7 de 16 MPa depois da ruptura



Figura 25 – Bloco 8 de 6 MPa depois da ruptura



Figura 26 – Bloco 8 de 4,5 MPa depois da ruptura



3.6 Análise estatística

A análise estatística foi utilizada ao longo de todo o trabalho. Para determinação dos mais favoráveis pontos de medição dos ensaios não destrutivos, utilizaram-se cálculos simples como de desvios médios de medições, de forma a investigar o grau de confiança de cada ponto testado.

Para verificação da influência da pré carga nos resultados dos ensaios não destrutivos, foram utilizados os valores médios das medições. Como o número de amostras de cada grupo foi relativamente pequeno, análises mais sofisticadas, como análises de variância, poderiam gerar resultados de difícil interpretação.

Ainda, foram largamente empregadas neste trabalho avaliações das possíveis correlações entre curvas, notadamente a específica avaliação de curvas de correlação de resistência característica do bloco com os resultados dos ensaios de ultrassom e esclerometria (velocidade do pulso ultrassônico e índice esclerométrico, respectivamente). Para tanto, utilizou-se o simples método dos mínimos quadrados, em que a curva mais adequada é considerada aquela cujo erro quadrático seja o menor dentre todos obtidos, ou seja, aquela que tem maior coeficiente de determinação R^2 .

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados. Na Fase 1 de ensaios, utilizaram os blocos numerados de 10 a 12; na Fase 2, os blocos com numeração de 7 a 9 e, por fim, na Fase 3 e 4, os blocos com numeração de 7 a 12.

A Fase 1 contempla um maior número de pontos de medição para os ensaios não destrutivos nos blocos de concreto. Os resultados dessa etapa, em que foram ensaiados três blocos de cada uma das três resistências consideradas, serviram, conforme planejado, para a definição dos pontos que continuariam na Fase 2 (pontos de interesse), em que mais três blocos de cada grupo de resistência foram analisados.

4.1 Ensaio de velocidade de pulso ultrassônico

O tempo obtido em cada ponto de ensaio (Figura 18) por meio do ensaio indireto, estão apresentados nas Tabelas 7 e 8, que resume os dados das fases 1 e 2.

Tabela 7 – Resultados de tempo medido (μ s) para os ensaios de ultrassom – método indireto horizontal

Classe de resistência	Posição	Fase 1						Fase 2					
		Bloco 10		Bloco 11		Bloco 12		Bloco 7		Bloco 8		Bloco 9	
		Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B
4,5 MPa	1-2	17,9	17,9	16,9	21,4	23,9	40,9	-	-	-	-	-	-
	1-3	96,9	72,4	73,9	77,4	79,1	114,7	-	-	-	-	-	-
	1-4	165,4	109,4	139,9	139,9	150,4	138,7	-	-	-	-	-	-
	1-5	238,0	157,4	186,9	195,2	188,9	187,4	-	-	-	-	-	-
	6-7	23,4	22,9	14,9	25,9	43,9	49,7	19,4	20,9	18,9	16,9	25,4	18,4
	6-8	85,6	72,4	55,9	92,2	97,4	108,9	68,4	70,2	84,9	59,9	82,4	62,9
	6-9	158,4	118,9	106,1	166,4	197,0	131,7	104,6	138,4	147,7	108,7	128,9	126,7
	6-10	202,0	139,4	176,4	201,0	233,0	209,0	159,2	194,0	198,0	170,4	195,0	187,0
	11-12	16,9	23,9	15,9	26,4	21,9	49,1	-	-	-	-	-	-
	11-13	88,9	71,4	55,2	94,9	112,0	100,7	-	-	-	-	-	-
	11-14	137,9	128,4	89,6	174,3	143,0	129,7	-	-	-	-	-	-
	11-15	212,0	142,9	165,6	229,0	287,0	191,9	-	-	-	-	-	-
6,0 MPa	1-2	21,4	23,4	16,9	21,9	21,4	16,9	-	-	-	-	-	-
	1-3	74,4	78,2	49,9	65,9	67,4	78,9	-	-	-	-	-	-
	1-4	113,9	111,1	121,0	108,6	115,2	96,4	-	-	-	-	-	-
	1-5	173,4	157,7	125,9	119,1	139,1	171,4	-	-	-	-	-	-
	6-7	25,7	25,7	19,9	22,4	23,9	17,9	23,2	27,0	22,5	21,4	21,7	24,1
	6-8	66,2	66,9	49,6	57,1	74,2	66,4	65,6	71,7	70,5	73,4	73,0	62,6
	6-9	108,2	111,9	98,6	95,9	107,9	97,9	117,3	119,0	125,0	114,3	129,4	112,2
	6-10	151,9	131,6	114,9	129,7	168,9	134,4	124,4	138,8	141,4	146,1	151,9	133,1
	11-12	21,4	24,9	21,9	24,9	23,4	21,9	-	-	-	-	-	-
	11-13	65,1	55,4	53,4	53,4	55,4	53,4	-	-	-	-	-	-
	11-14	113,7	98,4	96,2	96,9	110,9	95,7	-	-	-	-	-	-
	11-15	139,2	119,9	136,0	127,9	169,4	131,9	-	-	-	-	-	-
16,0 MPa	1-2	14,9	15,4	17,4	15,4	14,4	13,9	-	-	-	-	-	-
	1-3	34,1	47,9	49,9	46,6	34,6	36,9	-	-	-	-	-	-
	1-4	69,9	68,7	72,9	77,9	56,9	67,4	-	-	-	-	-	-
	1-5	75,4	93,9	95,9	89,4	74,7	89,9	-	-	-	-	-	-
	6-7	15,4	20,4	17,9	15,4	14,9	14,4	20,5	35,7	18,3	28,5	19,0	17,5
	6-8	42,4	56,1	45,9	46,1	32,6	45,9	76,3	82,3	77,6	47,7	57,0	54,4
	6-9	86,4	78,9	78,9	79,4	56,6	68,1	106,9	113,8	104,2	103,3	113,2	109,2
	6-10	92,2	113,1	88,9	89,9	84,4	93,9	137,3	127,1	136,2	138,2	147,9	137,6
	11-12	15,4	17,4	17,9	16,4	14,9	19,4	-	-	-	-	-	-
	11-13	43,4	44,7	45,7	44,9	33,4	44,9	-	-	-	-	-	-
	11-14	65,9	70,2	68,6	78,9	56,4	69,9	-	-	-	-	-	-
	11-15	82,9	85,9	87,4	96,2	77,1	86,4	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 – Resultados de tempo medido (μ s) para os ensaios de ultrassom – método indireto vertical

Classe de resistência	Posição	Fase 1						Fase 2					
		Bloco 10		Bloco 11		Bloco 12		Bloco 7		Bloco 8		Bloco 9	
		Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B
4,5 MPa	1-6	31,4	17,9	17,9	35,9	32,6	16,4	-	-	-	-	-	-
	1-11	57,9	56,7	47,6	61,7	82,4	47,2	-	-	-	-	-	-
	2-7	20,4	18,9	15,9	22,9	39,9	21,9	-	-	-	-	-	-
	2-12	81,4	72,4	47,4	83,9	84,6	57,4	-	-	-	-	-	-
	3-8	23,4	33,4	15,9	20,4	37,9	32,4	16,9	16,4	14,9	15,9	18,9	15,4
	3-13	60,9	60,1	59,4	64,4	64,4	57,9	53,4	57,9	61,9	59,4	60,9	58,4
	4-9	19,4	22,4	14,4	24,4	46,4	23,9	-	-	-	-	-	-
	4-14	75,4	73,1	50,7	83,4	64,9	73,4	-	-	-	-	-	-
	5-10	17,4	20,9	17,4	31,4	36,9	31,9	-	-	-	-	-	-
6,0 MPa	1-6	47,4	57,9	58,9	60,9	63,7	57,4	-	-	-	-	-	-
	1-11	33,9	19,4	32,9	34,9	30,4	24,9	-	-	-	-	-	-
	2-7	57,9	54,4	53,4	55,2	59,9	54,4	-	-	-	-	-	-
	2-12	19,9	18,4	13,4	19,9	13,9	13,9	-	-	-	-	-	-
	3-8	57,6	52,6	35,1	49,7	46,6	48,4	-	-	-	-	-	-
	3-13	25,4	14,9	9,9	15,9	19,4	1,4	20,2	22,0	20,6	31,1	27,6	24,0
	4-9	59,4	50,4	46,4	60,4	58,9	58,4	33,2	55,4	55,8	52,5	51,9	63,0
	4-14	29,1	20,4	15,4	17,4	21,9	17,4	-	-	-	-	-	-
	5-10	47,6	49,9	38,1	47,4	58,4	47,7	-	-	-	-	-	-
16,0 MPa	1-6	29,4	27,4	17,4	24,9	19,9	17,0	-	-	-	-	-	-
	1-11	57,4	47,2	53,2	55,1	53,9	56,9	-	-	-	-	-	-
	2-7	12,4	13,9	10,9	9,9	8,9	7,9	-	-	-	-	-	-
	2-12	38,9	26,9	45,9	29,1	27,9	26,9	-	-	-	-	-	-
	3-8	11,9	11,4	17,4	11,9	11,9	9,4	-	-	-	-	-	-
	3-13	38,9	28,4	42,2	29,7	29,7	26,4	-	-	-	-	-	-
	4-9	10,4	10,9	13,4	9,9	9,4	10,9	25,0	20,1	26,6	27,0	22,8	16,5
	4-14	26,4	46,9	28,6	27,7	29,2	26,9	57,1	57,7	56,5	52,2	45,1	43,5
	5-10	12,4	12,9	11,9	12,9	11,4	10,4	-	-	-	-	-	-
16,0 MPa	1-6	35,9	29,4	38,9	38,4	28,4	27,9	-	-	-	-	-	-
	1-11	10,4	8,4	12,9	9,9	11,4	8,9	-	-	-	-	-	-
	2-7	27,9	27,7	40,9	29,6	28,1	25,7	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

A seguir, na Tabela 9, apresentam-se o tempo obtido em cada ponto de ensaio (Figura 18), por meio do ensaio direto).

Tabela 9 – Resultado de tempo medido (μ s) para os ensaios de ultrassom – método direto

Classe de resistência	Posição	Fase 1			Fase 2		
		Bloco 10	Bloco 11	Bloco 12	Bloco 7	Bloco 8	Bloco 9
4,5 MPa	1	39,9	41,4	43,4	-	-	-
	2	40,6	43,9	45,9	-	-	-
	3	40,4	43,1	44,6	-	-	-
	4	39,4	38,9	40,9	39,9	39,9	39,4
	5	40,4	40,9	44,1	41,4	41,4	42,4
	6	41,4	40,9	43,9	41,6	41,1	42,4
	7	40,9	39,9	43,4	-	-	-
	8	44,6	41,2	44,4	-	-	-
	9	42,1	41,1	44,4	-	-	-
	10	130,7	124,1	130,4	-	-	-
	11	141,6	131,1	157,6	-	-	-
	12	135,1	130,4	162,2	-	-	-
	13	118,9	129,4	125,1	-	-	-
	14	125,4	140,9	126,7	-	-	-
	15	125,9	140,9	142,4	-	-	-
6,0 MPa	1	37,4	37,6	38,2	-	-	-
	2	39,4	39,1	38,7	-	-	-
	3	38,9	38,1	38,9	-	-	-
	4	37,2	36,4	38,1	37,4	37,4	37,2
	5	38,7	37,4	38,9	38,6	38,4	38,4
	6	37,4	36,7	37,9	38,7	37,9	36,9
	7	37,6	36,7	38,4	-	-	-
	8	39,7	37,9	38,6	-	-	-
	9	38,9	37,4	38,9	-	-	-
	10	109,9	111,7	112,2	-	-	-
	11	114,4	114,6	114,4	-	-	-
	12	115,6	111,6	111,4	-	-	-
	13	109,7	111,7	115,7	-	-	-
	14	116,2	115,2	115,4	-	-	-
	15	110,9	110,6	112,9	-	-	-
16,0 MPa	1	30,4	30,9	30,1	-	-	-
	2	30,9	31,9	30,7	-	-	-
	3	30,9	31,6	30,6	-	-	-
	4	31,4	31,7	30,7	32,9	32,9	31,9
	5	31,9	31,9	32,1	32,4	32,9	31,9
	6	31,2	31,4	30,9	33,1	31,9	31,6
	7	30,9	30,9	29,4	-	-	-
	8	30,9	31,6	30,7	-	-	-
	9	30,6	31,4	29,9	-	-	-
	10	88,2	86,9	86,9	-	-	-
	11	90,4	91,9	89,7	-	-	-
	12	89,4	88,4	88,4	-	-	-
	13	87,4	87,4	85,9	-	-	-
	14	89,9	89,9	89,9	-	-	-
	15	88,7	89,2	89,2	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Para o método indireto dos ensaios de ultrassom (na horizontal e vertical), o parâmetro utilizado para a seleção dos pontos foi o simples desvio médio das somas dos intervalos de tempo medidos que determinam a velocidade do pulso ultrassônico; isto é, para o ensaio indireto feito na horizontal, em que há quatro medições em cada linha para determinação da velocidade, somam-se os 4 valores e está é a soma dos intervalos de tempo que determinam a associada velocidade ; para o ensaio feito na vertical, em que há duas medições para cada coluna para determinação da velocidade, somam-se os

dois intervalos medidos, obtendo-se, analogamente, a soma dos intervalos de tempo utilizados para determinar a associada velocidade. O desvio médio das referidas somas para os blocos de uma mesma resistência constitui o parâmetro, ora explicado, para a seleção dos pontos, conforme expressão inserida a seguir.

$$\text{Desvio médio} = \sum_{i=1}^n \frac{\|\mu - Vi\|}{n}$$

Em que:

n = Número de linhas ou colunas para as quais foram determinadas as somas dos intervalos de tempo necessários para cálculo da velocidade do pulso ultrassônico

Vi = Soma “i” dos intervalos de tempo necessários para cálculo da velocidade do pulso ultrassônico

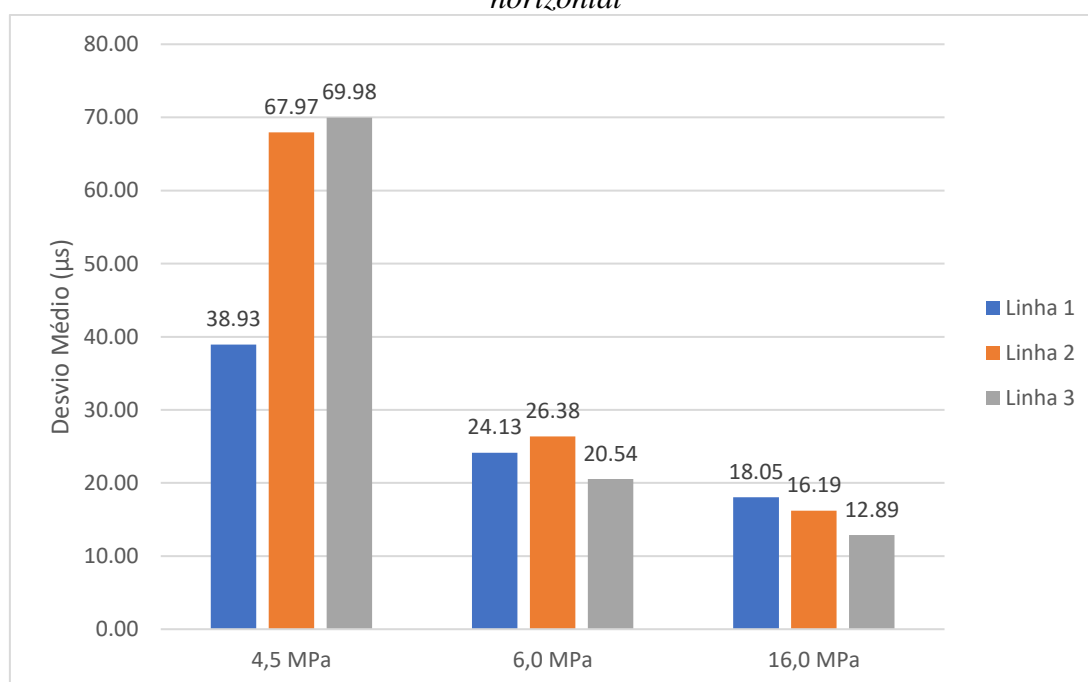
μ = Média das somas dos intervalos de tempo necessários para cálculo da velocidade do pulso ultrassônico

Os pontos que apresentam menores desvios são preferencialmente escolhidos, uma vez que, em média, têm menor variação em suas medições, e, portanto, seus valores são mais confiáveis. Nos gráficos a seguir, apresentam-se os resultados

Para o ensaio indireto na horizontal, conforme gráfico da Figura 27, observa-se que a linha que apresentou, em média, menor desvio, foi a linha de número 1, superior. Para os grupos de resistência de 6,0 MPa e 16,0 MPa, os resultados foram parecidos para todas as linhas, mas enquanto as linhas 2 e 3 apresentaram elevados desvios para a menor resistência, de 4,5 MPa, a linha 1 seguiu apresentando desvios menores, praticamente a metade em comparação com as outras duas linhas. Assim, selecionou-se a linha 2 para continuidade dos ensaios na fase 2, considerando que seu desempenho, frente a linha 1, só ficou aquém para a menor resistência e, em uma ocasião de realização do ensaio de ultrassom em uma edificação já construída, as linhas da extremidade (1 e 3), são as regiões de fronteiras com outros blocos, o que poderia interferir nos resultados em relação ao estudo deste trabalho, em que os blocos são ensaiados de forma isolada. Situação semelhante ocorreria também na execução dos ensaios quando os blocos estão submetidos a uma carga de compressão

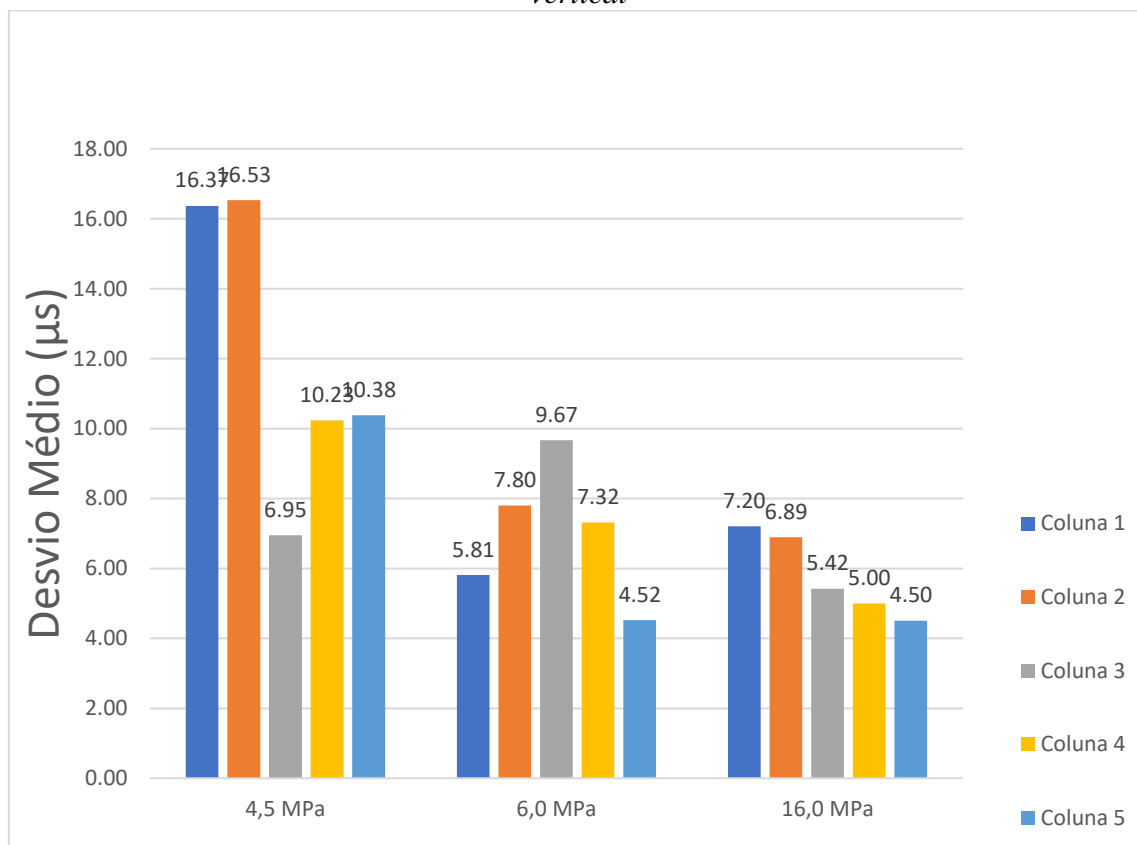
Para o ensaio indireto na vertical, cujo gráfico com desvios está contido na figura 26, as colunas 3, 4, e 5 apresentaram desvios semelhantes e notavelmente inferiores às colunas 1 e 2, que, sobretudo para a resistência de 4,5 MPa, mostraram grande variação. Escolheu-se a coluna de número 2, central, para a continuidade dos ensaios na fase 2, considerando que se obtiveram desvios satisfatórios e, em medições realizadas em campo, provavelmente seria a coluna com menor influência das condições de contorno, como outros blocos de alvenaria.

Figura 27 – Gráfico com desvios médios para as linhas do ensaio de ultrassom indireto na horizontal



Fonte: Elaboração própria

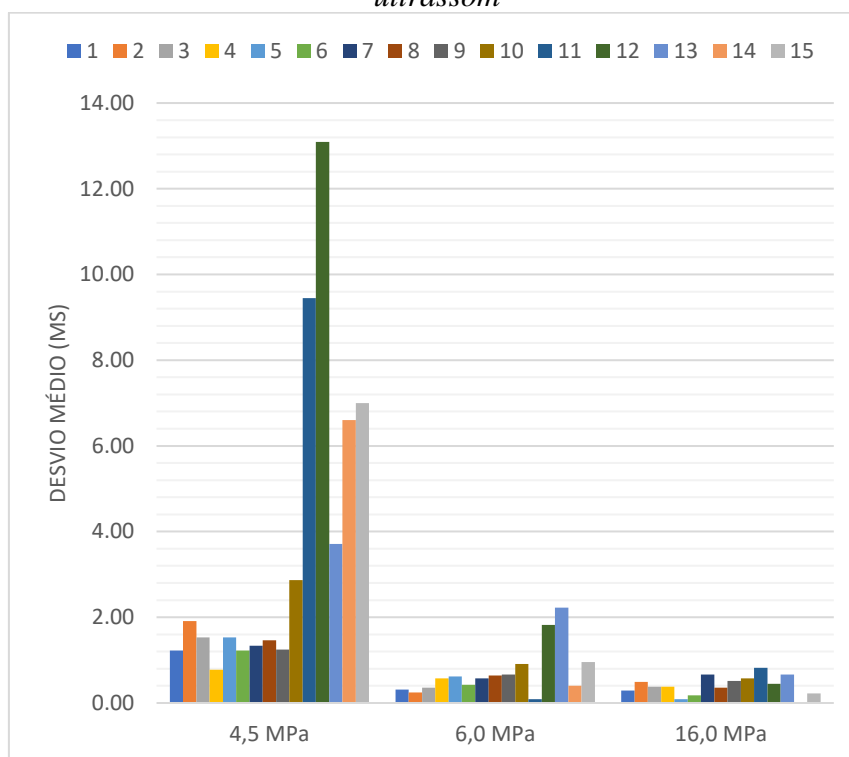
Figura 28 – Gráfico com desvios médios para as colunas do ensaio de ultrassom indireto na vertical



Fonte: Elaboração própria

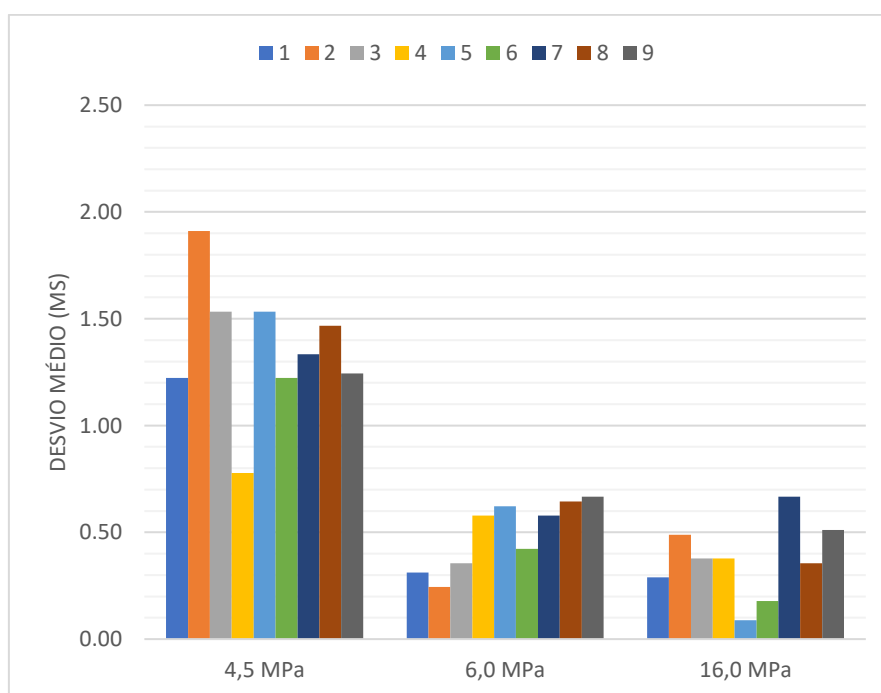
Para o ensaio direto, cujos desvios são mostrados na Figura 29, as medições de números 1 a 9 têm menores desvios em relação àquelas correspondentes às paredes longitudinais, com números de 10 a 15, que foram imediatamente descartadas. No gráfico contido na Figura 30, mostram-se os desvios apenas para as medições realizadas nos septos transversais (números 1 a 9), em que se nota uma considerável paridade. Escolheram-se, para o prosseguimento dos ensaios da fase 2, as três medições no septo transversal central, de números 4, 5 e 6, justamente por serem essas as posições que, para o ensaio direto realizado in loco, provavelmente estariam mais isoladas em relação a outros elementos que não o bloco de ensaio.

Figura 29 – Gráfico com desvios médios para as posições medidas pelo método direto do ultrassom



Fonte: Elaboração própria

Figura 30 – Gráfico com desvios médios para as posições medidas pelo método direto do ultrassom para os septos transversais



Fonte: Elaboração própria

4.2 Ensaio de dureza superficial

Os valores dos índices esclerométricos obtidos em todos os pontos de ensaios (Figura 16) e nos seis blocos de cada grupo de resistência estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados (IE) dos ensaios de dureza superficial

Classe de resistência	Posição	Fase 1						Fase 2					
		10		11		12		7		8		9	
		Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B
4,5 MPa	1	26,5	29,5	21,0	28,0	29,5	27,5	23,0	28,5	25,5	23,5	27,5	24,5
	2	14,0	11,5	11,0	10,0	12,0	10,0	11,5	9,5	10,0	9,0	11,0	11,0
	3	30,5	34,0	34,5	32,0	32,5	29,0	34,0	31,5	30,0	30,5	37,5	30,0
	4	12,0	9,0	10,5	9,0	12,0	11,5	12,5	10,0	9,5	9,0	11,0	9,5
	5	19,5	27,0	18,0	28,0	25,0	24,0	24,0	18,5	25,0	25,0	28,0	21,5
	6	30,0	31,5	25,5	32,0	34,0	34,0	32,0	37,5	30,0	30,0	30,0	31,0
	7	15,5	19,5	17,5	14,5	18,0	17,0	14,0	16,5	18,0	19,0	18,5	16,5
	8	35,5	10,5	33,5	34,5	36,0	33,0	35,0	34,5	35,5	35,5	36,5	34,0
	9	18,5	8,0	16,0	16,0	19,0	19,0	17,5	16,0	20,0	20,0	19,0	17,0
	10	33,5	26,0	31,5	28,0	28,0	28,5	35,0	33,0	33,5	31,5	38,5	33,0
	11	21,0	19,0	19,0	23,0	25,0	27,0	23,0	21,0	27,5	27,0	22,5	28,5
	12	10,0	9,5	10,5	11,0	9,5	10,5	9,0	8,0	8,0	10,0	8,5	7,5
	13	34,5	30,5	27,5	26,0	32,0	32,5	32,5	24,5	31,5	29,0	37,5	30,0
	14	9,0	10,0	9,5	10,5	7,5	10,0	10,5	8,0	8,5	19,5	8,0	8,0
	15	27,5	26,0	22,0	19,5	19,5	20,0	26,0	21,0	26,5	36,0	24,0	19,0
6,0 MPa	1	32,0	32,5	27,5	35,5	29,5	26,0	33,5	35,0	38,0	35,0	35,0	31,0
	2	14,5	13,5	18,5	16,0	14,0	13,0	13,0	18,5	13,0	15,0	20,0	24,5
	3	40,0	41,0	36,0	42,5	33,0	34,5	39,5	37,5	39,5	37,5	37,0	30,5
	4	17,0	16,0	17,0	16,5	13,0	11,0	14,0	13,0	15,5	14,0	25,5	27,5
	5	34,5	31,5	34,5	35,5	31,0	33,0	35,0	30,0	34,0	31,0	33,5	29,0
	6	34,5	26,0	40,5	34,5	34,5	28,5	37,0	37,0	36,0	40,0	34,5	32,0
	7	26,0	26,0	28,5	27,0	23,0	27,0	26,5	32,5	28,0	28,0	30,0	26,0
	8	42,5	39,5	47,0	39,5	43,0	40,5	39,5	43,5	47,0	43,5	41,5	38,5
	9	26,0	26,5	28,0	26,0	24,0	26,0	27,5	26,0	29,0	24,5	31,0	29,5
	10	39,5	32,5	35,5	44,0	31,0	38,0	43,0	45,0	42,5	34,0	39,5	37,5
	11	25,5	26,0	29,5	30,5	28,5	25,5	33,5	30,5	29,0	29,5	41,0	31,5
	12	16,0	18,5	20,5	17,5	19,5	23,5	21,0	18,5	23,5	18,5	16,0	15,5
	13	41,0	33,0	33,0	32,5	33,0	36,0	39,5	36,0	41,5	31,5	44,0	40,0
	14	15,0	19,5	18,0	18,5	18,0	22,5	18,5	18,5	22,0	17,0	17,5	18,5
	15	28,0	24,0	29,5	29,5	25,0	29,5	32,5	30,0	39,5	28,5	37,0	34,0
16,0 MPa	1	45,0	51,5	45,0	43,0	50,0	51,0	49,5	47,0	42,5	48,5	46,5	45,5
	2	40,0	39,0	40,0	43,5	41,5	38,0	37,0	36,5	34,5	40,0	39,0	39,5
	3	56,5	59,0	56,5	55,0	59,0	56,5	48,0	52,0	53,5	51,5	54,0	49,5
	4	46,0	36,5	46,0	41,0	39,0	36,0	37,5	38,5	35,5	33,0	39,0	40,5
	5	51,0	51,5	51,0	45,5	50,0	37,0	37,0	49,5	46,0	47,0	48,5	49,0
	6	46,5	51,5	46,5	56,5	57,5	34,5	51,5	44,0	45,5	50,0	51,0	50,0
	7	49,5	44,5	49,5	53,0	51,0	53,5	47,5	53,0	51,0	49,0	53,5	53,5
	8	50,5	57,5	50,5	58,0	64,5	64,5	41,5	60,0	54,5	41,0	60,5	56,0
	9	54,0	51,0	54,0	55,0	50,5	47,0	51,5	45,5	49,0	50,0	49,5	53,5
	10	53,0	45,5	53,0	55,0	57,5	61,5	53,0	57,0	52,5	52,0	56,0	56,0
	11	52,0	49,0	52,0	48,0	47,0	52,0	47,0	51,0	48,0	44,0	47,5	40,5
	12	51,0	46,5	51,0	45,5	44,0	44,5	43,5	44,0	47,0	45,0	45,5	42,5
	13	62,5	51,0	62,5	58,5	60,0	55,0	53,5	51,5	53,0	59,5	57,0	52,5
	14	48,5	39,5	48,5	44,5	37,0	41,0	37,0	38,0	45,5	46,0	46,5	43,0
	15	50,0	33,5	50,0	45,0	52,5	49,5	52,0	49,5	53,5	50,5	47,0	50,5

Fonte: Elaboração própria

Para escolha dos pontos que seguiriam sendo medidos na Fase 2, o parâmetro escolhido foi o desvio padrão das medições, conforme Tabela 11. As células marcadas em verde representam, para cada ponto, a classe da resistência para a qual o desvio padrão foi o menor observado. Observa-se, pois, que os desvios padrões para as 15

posições testadas têm ordem de grandeza parecida para as três resistências estudadas. Nota-se ainda, que em 9 das 15 posições, a classe de resistência que apresenta menor desvio foi a de 4,5 MPa. Assim, optou-se por seguir fazendo medições, na Fase 2, em todos os 15 pontos (em cada face) propostos na Fase 1, inclusive tendo em consideração que, tradicionalmente, o índice esclerométrico é determinado por uma média de uma série de pontos na área de análise.

Tabela 11 – Tabela com os desvios médios (IE) para as medições de dureza superficial

Desvios médios para as medições nos 15 pontos estudados															
Classe de resistência	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Ponto 15
4,5 MPa	2,26	0,98	1,94	1,13	2,83	2,04	1,38	3,72	2,14	2,75	2,81	0,94	2,75	1,82	3,75
6,0 MPa	2,79	2,83	2,65	3,39	1,84	2,93	1,69	2,29	1,67	3,75	2,80	2,13	3,71	1,35	3,44
16,0 MPa	2,51	1,71	2,83	2,89	3,69	4,46	2,26	6,10	2,29	2,83	2,53	2,03	3,63	3,68	3,61

Fonte: Elaboração própria

O esclerômetro utilizado nos fornecia diretamente o índice esclerométrico (IE) corrigido do ponto de impacto, também chamado de coeficiente de ricochete (Q). Este valor está livre de fontes de erros que o índice esclerométrico tradicional pode possuir, como a fricção na barra guia, pela influência da gravidade, entre outros.

A NBR 7584:2012 sugere que o índice esclerométrico de uma área de ensaio seja determinado pela média de 16 pontos de impacto distribuídos na área. Como já mencionado na descrição da metodologia, esta norma diz respeito aos ensaios de dureza superficial em concretos plásticos. Assim, para blocos de alvenaria estrutural decidiu-se fazer uma adaptação. Primeiramente, determinou-se o índice esclerométrico das duas faces do bloco (Lado A e Lado B) através da média dos 15 pontos de impactos de cada uma. De forma semelhante, o índice esclerométrico do bloco foi determinado através da média dos valores de suas duas faces. Os resultados obtidos nos seis blocos de cada grupo de resistência estão apresentados nas tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12 – Tabela com os desvios médios para as medições de dureza superficial

Blocos 4,5 Mpa						
IE	10	11	12	7	8	9
IE Lado A	22,50	20,50	22,63	22,63	22,60	23,87
IE Lado B	20,10	21,47	22,23	21,20	23,63	21,40
IE Bloco	21,30	20,98	22,43	21,92	23,12	22,63

Fonte: Elaboração própria

Tabela 13 – Tabela com os desvios médios para as medições de dureza superficial

Blocos 6 Mpa						
IE	10	11	12	7	8	9
IE Lado A	28,80	29,57	26,67	30,23	31,87	32,20
IE Lado B	27,07	29,70	27,63	30,10	28,50	29,70
IE Bloco	27,93	29,63	27,15	30,17	30,18	30,95

Fonte: Elaboração própria

Tabela 14 – Tabela com os desvios médios para as medições de dureza superficial

Blocos 16 Mpa						
IE	10	11	12	7	8	9
IE Lado A	50,40	50,40	50,73	45,80	47,43	49,40
IE Lado B	47,13	49,80	48,10	47,80	47,13	47,96
IE Bloco	48,77	50,10	49,42	46,80	47,28	48,68

Fonte: Elaboração própria

Analisando as tabelas, podemos perceber a proximidade dos resultados nos diferentes blocos de mesma resistência, mostrando a boa confiabilidade deste tipo de ensaio. Além disso, como esperado, nota-se o aumento do IE conforme o aumento da resistência, onde o resultado praticamente dobrou de valor nos blocos de 16 MPa de resistência em comparação com os de 4,5 MPa.

Os valores de índice esclerométricos de cada bloco foram utilizados na análise da correlação com os resultados do ensaio destrutivo, conforme pode ser visto mais adiante no trabalho.

4.3 Ensaio velocidade de pulso ultrassônico com aplicação de cargas de compressão

Neste item, são apresentados os gráficos das distâncias dos transdutores emissor e receptor e os tempos obtidos para cada uma delas, de forma que a tangente das linhas de regressão é a velocidade do pulso, obtida pelo método indireto.

Primeiramente, ressalta-se a boa correlação linear obtida nas dispersões. As velocidades, ou tangentes, que constam nos gráficos são resumidas na Tabela 15. Para 12 dos 18 blocos (66,37%), as velocidades na condição de carga de 70% de fb resultaram as maiores em relação aos valores de 30% de fb e sem carga. Ainda, para 10 dos 18 blocos (55%), as velocidades na condição sem carga resultaram as menores em relação aos valores de 30% e 70% de fb.

Esses resultados sugerem que o carregamento em um bloco influencia na velocidade da onda no ensaio indireto, com tendência de obtenção de maiores velocidades para cargas maiores, ainda que os desvios médios para este ensaio tenham se mostrado significativos.

Na presença de vazios, a onda ultrassônica tende a “desviar” e se propagar pelo material sólido, no caso o concreto prensado dos blocos. Sendo assim, quando os blocos são carregados, é possível que haja diminuição de seu índice de vazios, de forma que o tempo de propagação entre os transdutores diminua, e consequentemente a velocidade aumente.

Tabela 15 – Tabela com as velocidades calculadas dos ensaios de ultrassom indireto com e sem carregamento

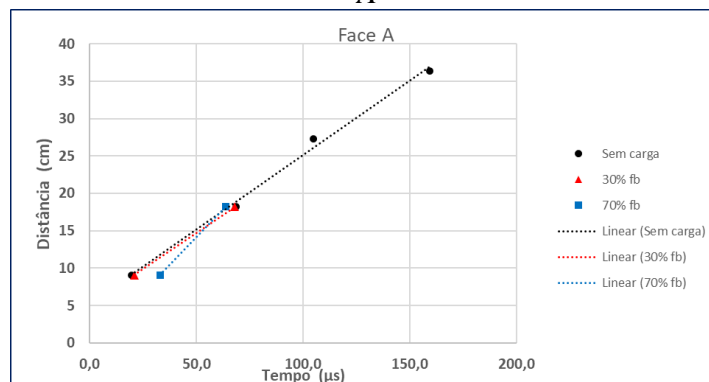
Velocidades calculadas (km/s)				
Classe de resistência	Bloco	Sem carga	30% fb	70% fb
4,5 MPa	7	1,77	1,79	2,55
	8	1,64	2,69	2,57
	9	1,61	2,20	2,43
	10	1,86	2,19	2,43
	11	1,58	1,47	1,29
	12	1,54	2,25	2,26
6,0 MPa	7	2,35	2,53	2,25
	8	2,15	2,91	-
	9	2,17	2,35	3,13
	10	2,31	2,25	2,32
	11	2,58	2,42	2,58
	12	2,14	2,22	2,25
16,0 MPa	7	2,57	2,53	4,50
	8	2,30	2,49	3,80
	9	2,10	2,39	3,53
	10	3,05	2,16	3,17
	11	3,48	2,18	2,93
	12	3,68	2,74	3,21

*Para este bloco, não foram medidos os tempos de propagação por dificuldades de laboratório

Fonte: Elaboração própria

Figura 31 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 7 de 4,5 MPa – Face

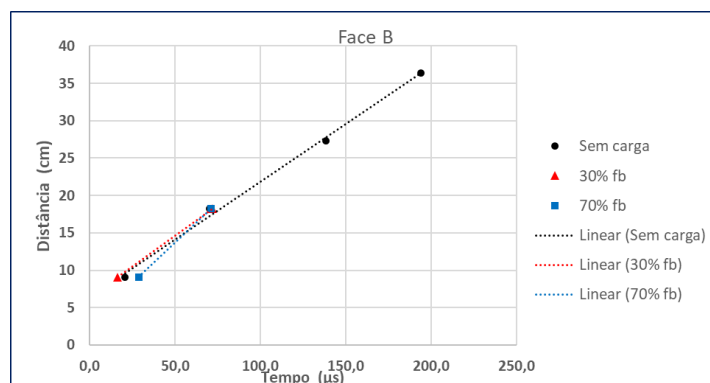
A



Fonte: Elaboração própria

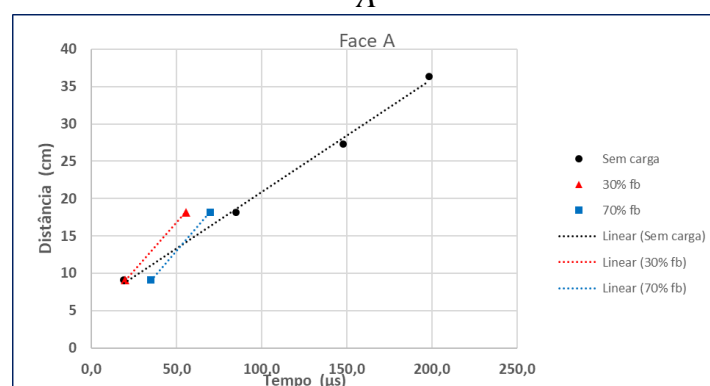
Figura 32 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 7 de 4,5 MPa – Face

B



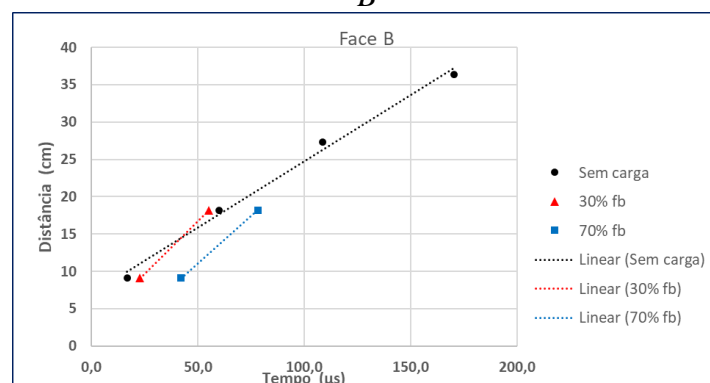
Fonte: Elaboração própria

Figura 33 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 8 de 4,5 MPa – Face A



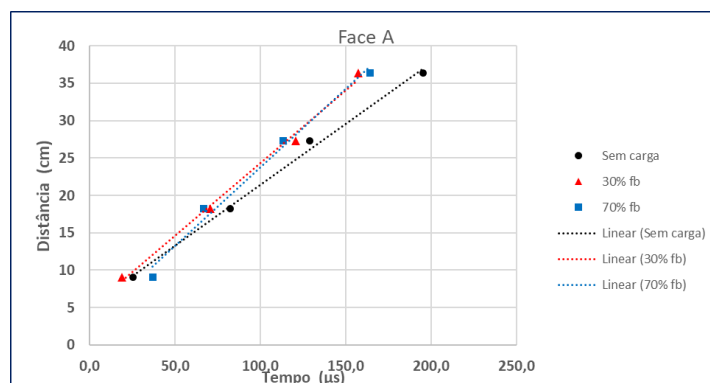
Fonte: Elaboração própria

Figura 34 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 8 de 4,5 MPa – Face B



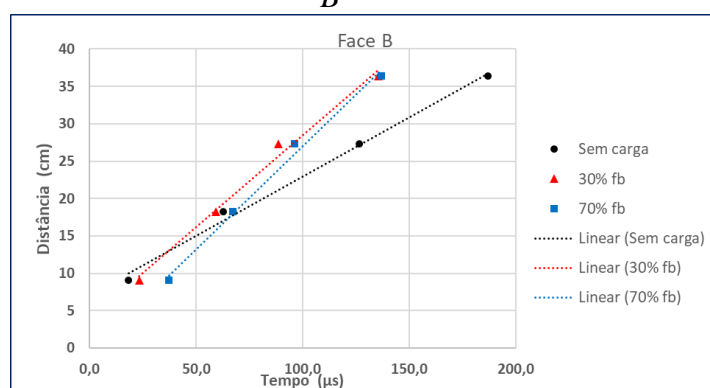
Fonte: Elaboração própria

Figura 35 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 9 de 4,5 MPa – Face A



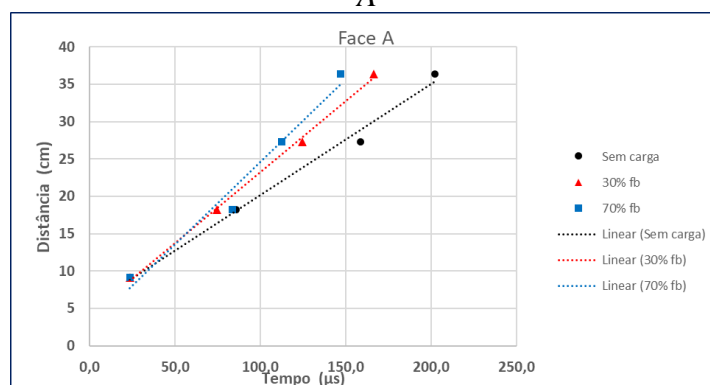
Fonte: Elaboração própria

Figura 36 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 9 de 4,5 MPa – Face B



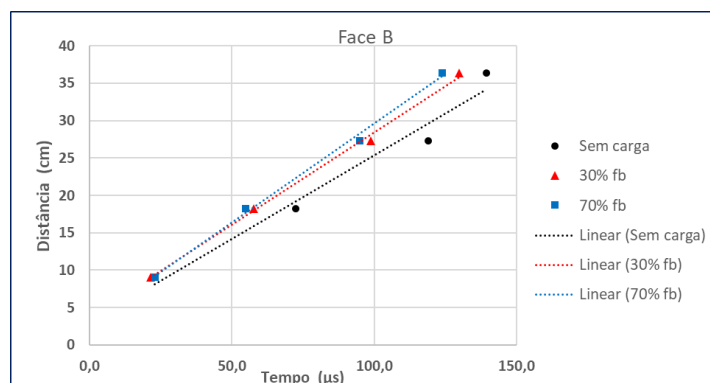
Fonte: Elaboração própria

Figura 37 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 10 de 4,5 MPa – Face A



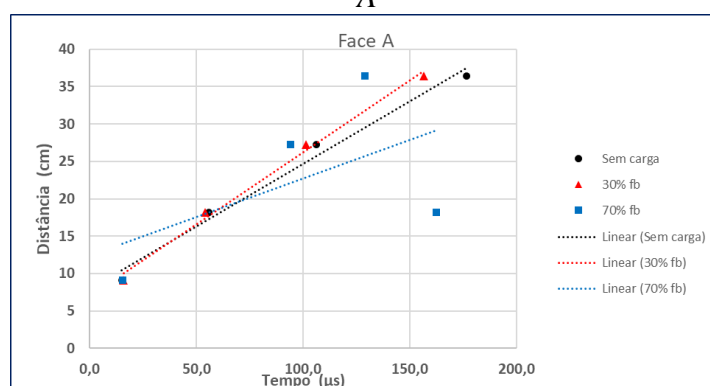
Fonte: Elaboração própria

Figura 38– Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 10 de 4,5 MPa – Face B



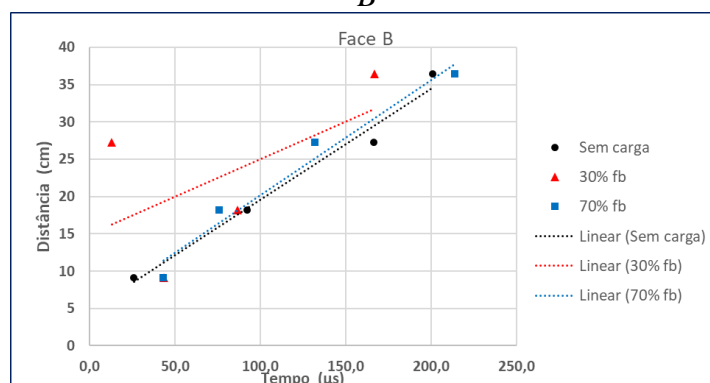
Fonte: Elaboração própria

Figura 39 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 11 de 4,5 MPa – Face A



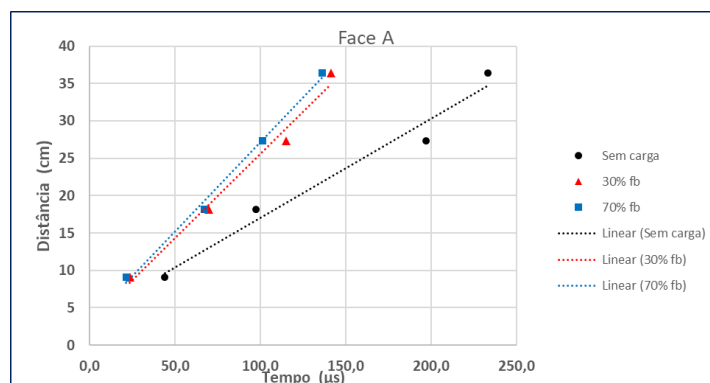
Fonte: Elaboração própria

Figura 40 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 11 de 4,5 MPa – Face B



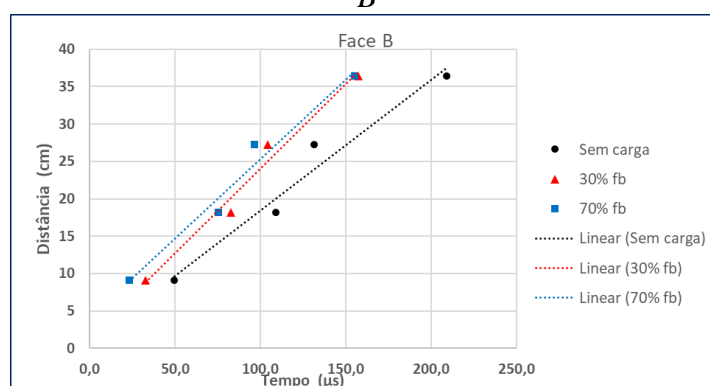
Fonte: Elaboração própria

Figura 41 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 12 de 4,5 MPa – Face A



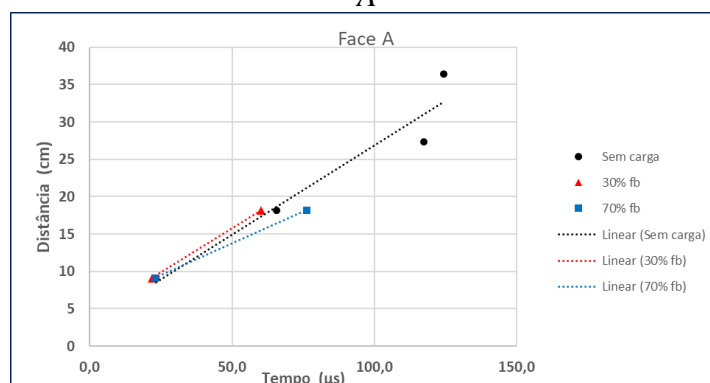
Fonte: Elaboração própria

Figura 42 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 12 de 4,5 MPa – Face B



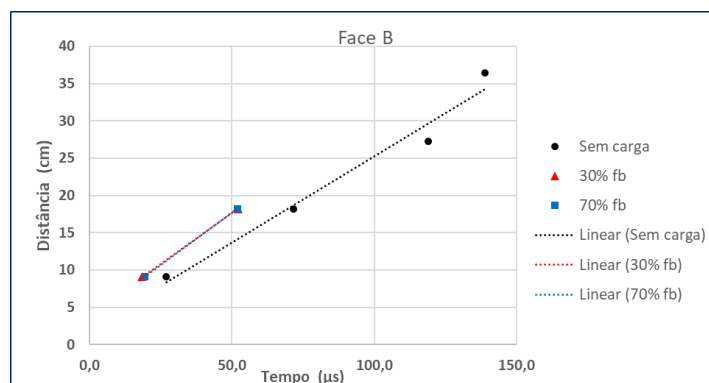
Fonte: Elaboração própria

Figura 43 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 7 de 6,0 MPa – Face A



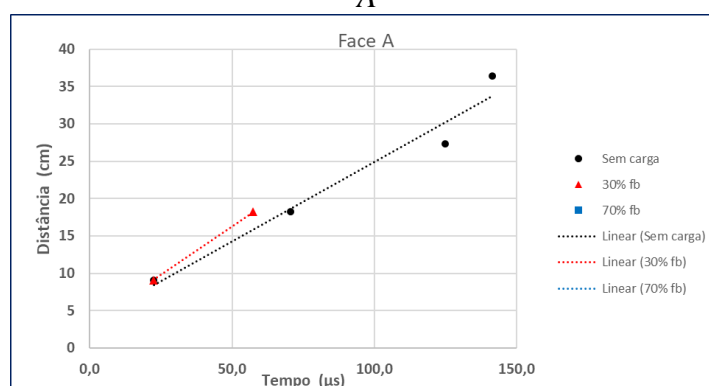
Fonte: Elaboração própria

Figura 44 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 7 de 6,0 MPa – Face B



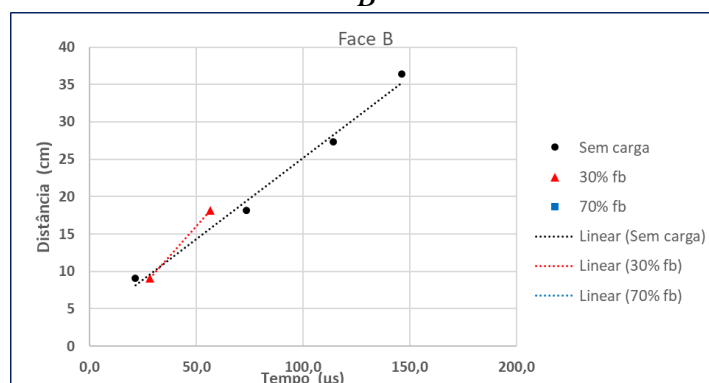
Fonte: Elaboração própria

Figura 45 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 8 de 6,0 MPa – Face A



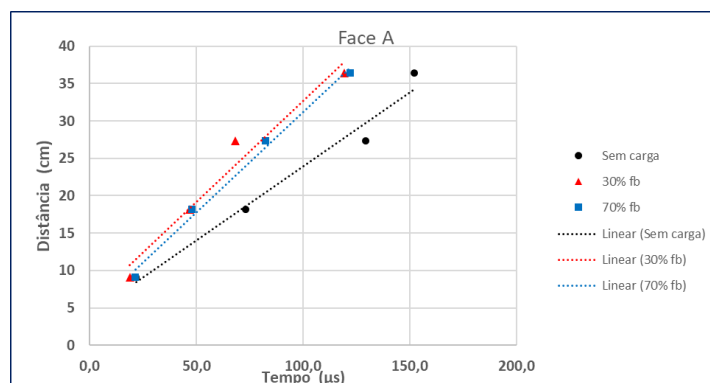
Fonte: Elaboração própria

Figura 46 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 8 de 6,0 MPa – Face B



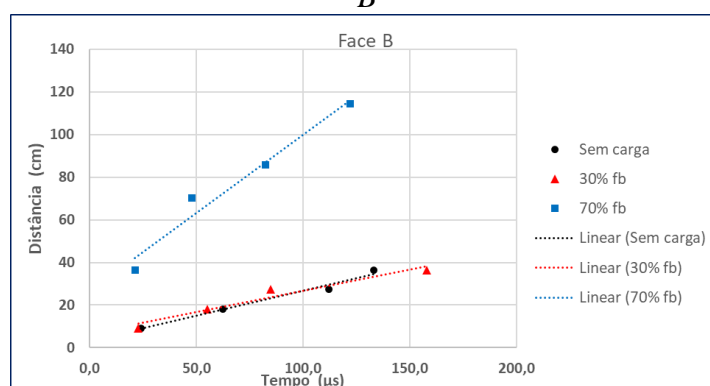
Fonte: Elaboração própria

Figura 47 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 9 de 6,0 MPa – Face A



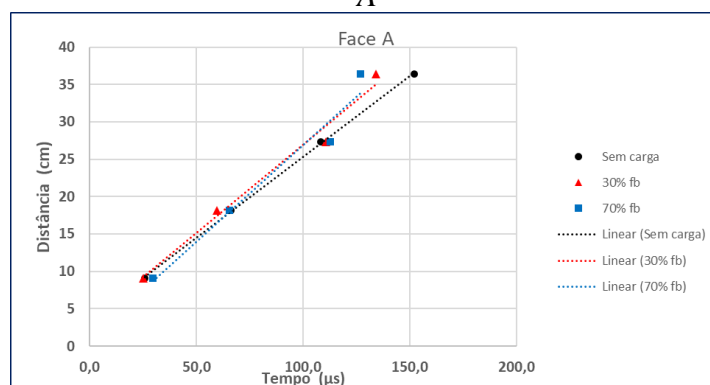
Fonte: Elaboração própria

Figura 48 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 9 de 6,0 MPa – Face B



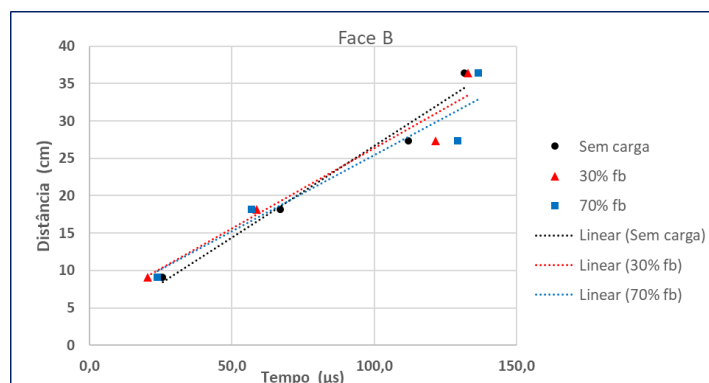
Fonte: Elaboração própria

Figura 49 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 10 de 6,0 MPa – Face A



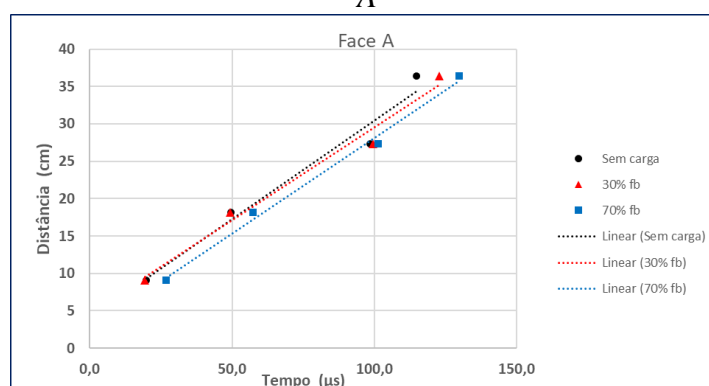
Fonte: Elaboração própria

Figura 50 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 10 de 6,0 MPa – Face B



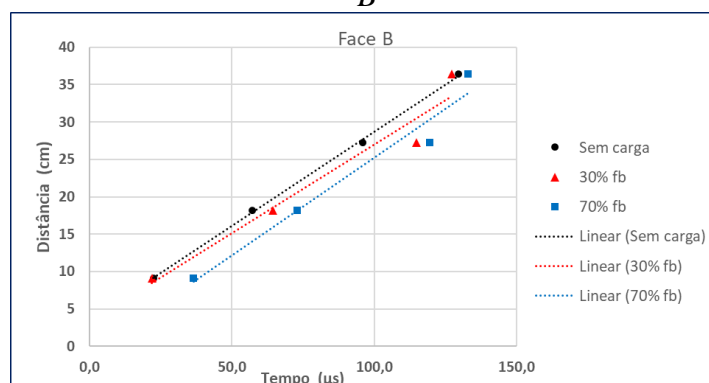
Fonte: Elaboração própria

Figura 51 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 11 de 6,0 MPa – Face A



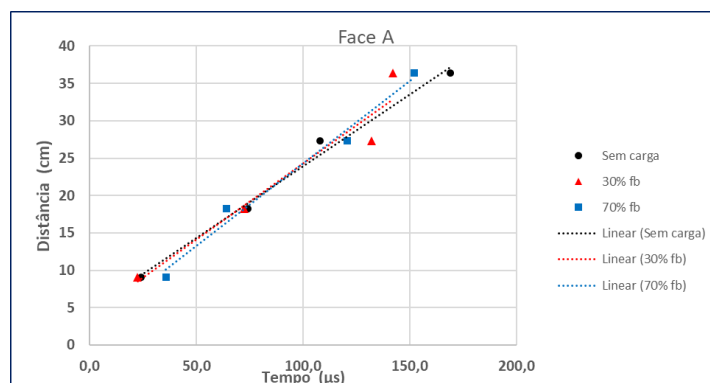
Fonte: Elaboração própria

Figura 52 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 11 de 6,0 MPa – Face B



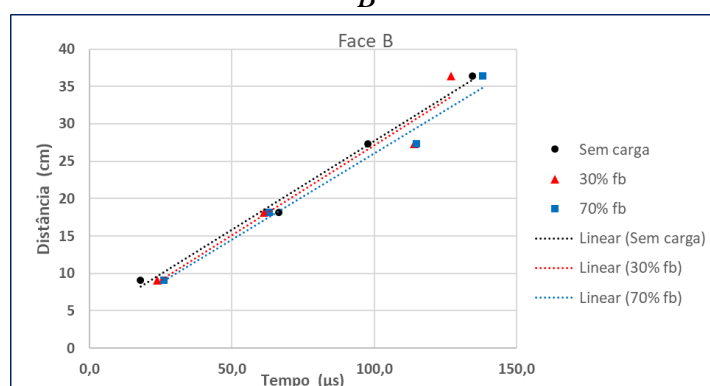
Fonte: Elaboração própria

Figura 53 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 12 de 6,0 MPa – Face A



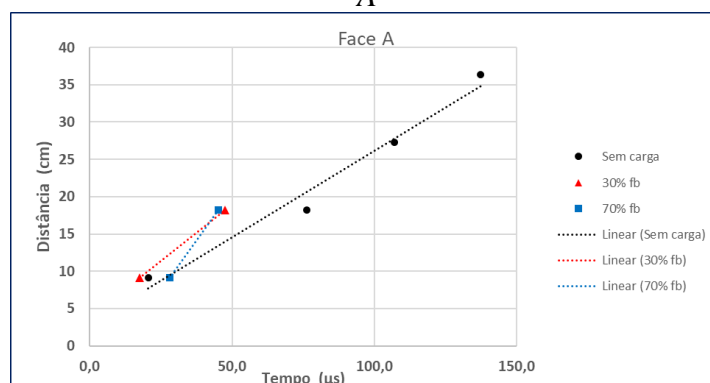
Fonte: Elaboração própria

Figura 54 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 12 de 6,0 MPa – Face B



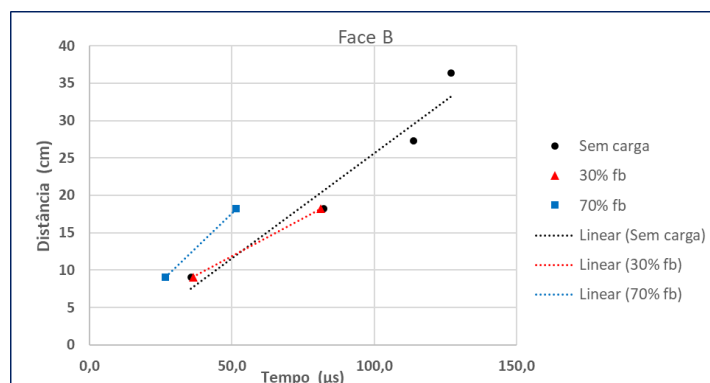
Fonte: Elaboração própria

Figura 55 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 7 de 16,0 MPa – Face A



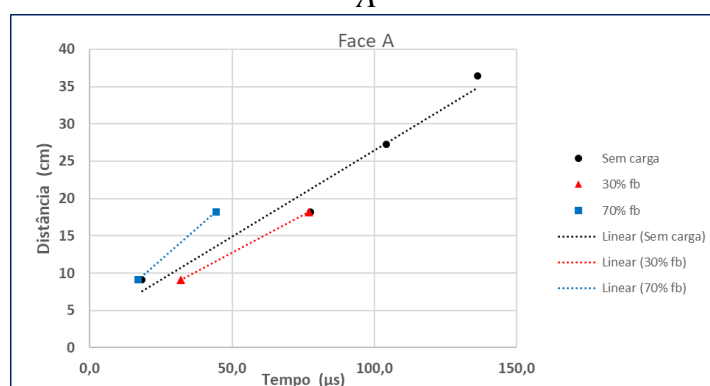
Fonte: Elaboração própria

Figura 56 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 7 de 16,0 MPa – Face B



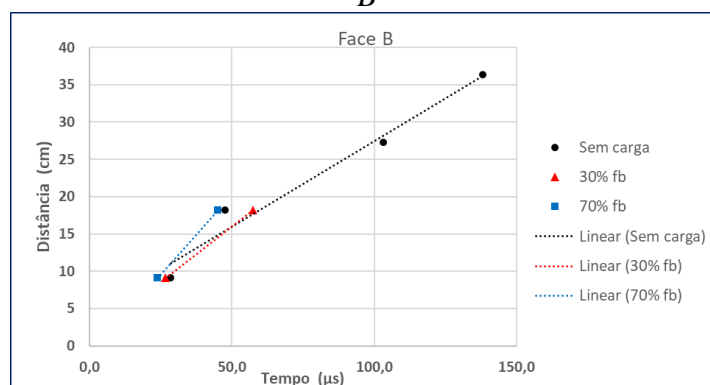
Fonte: Elaboração própria

Figura 57 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 8 de 16,0 MPa – Face A



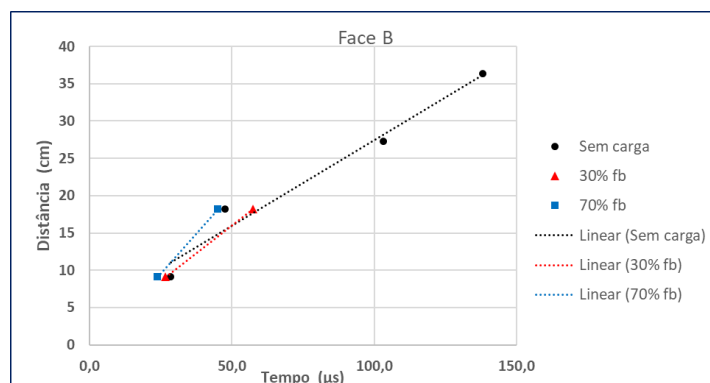
Fonte: Elaboração própria

Figura 58 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 8 de 16,0 MPa – Face B



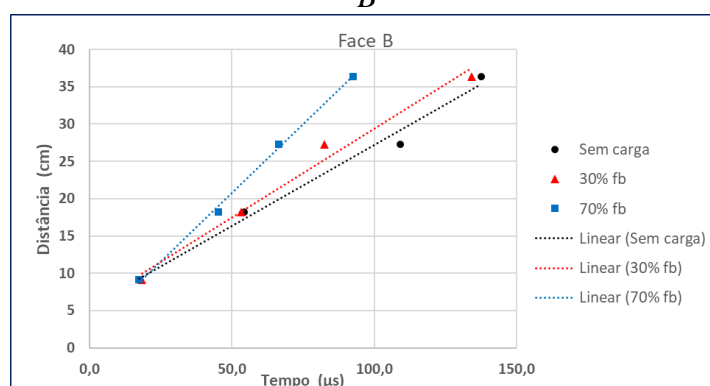
Fonte: Elaboração própria

Figura 59 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 9 de 16,0 MPa – Face A



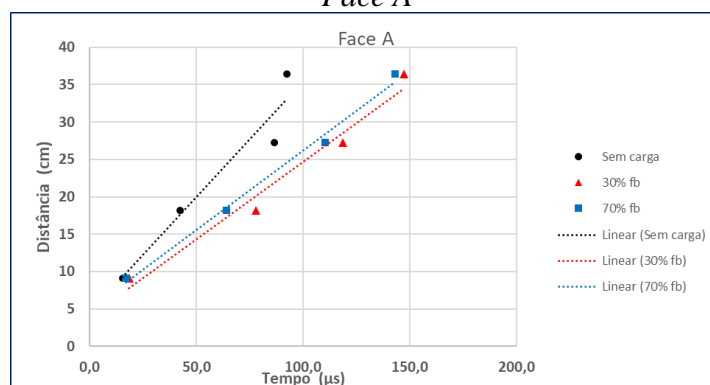
Fonte: Elaboração própria

Figura 60 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 9 de 16,0 MPa – Face B



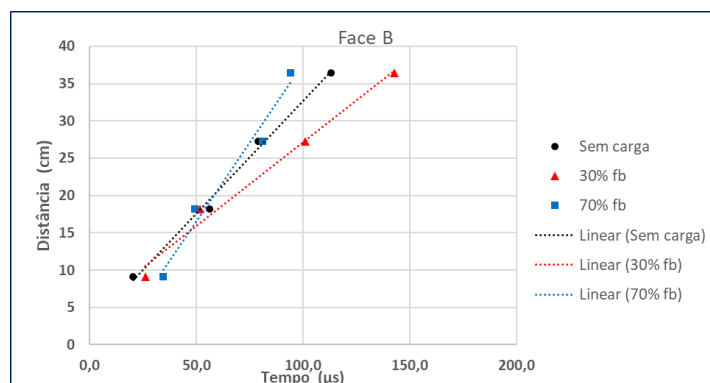
Fonte: Elaboração própria

Figura 61 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 10 de 16,0 MPa – Face A



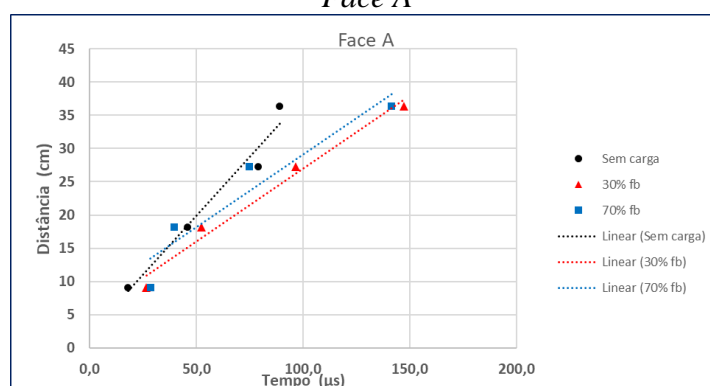
Fonte: Elaboração própria

Figura 62 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 10 de 16,0 MPa – Face B



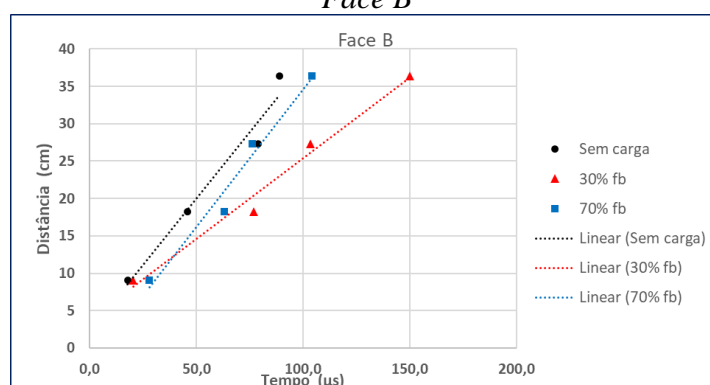
Fonte: Elaboração própria

Figura 63 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 11 de 16,0 MPa – Face A



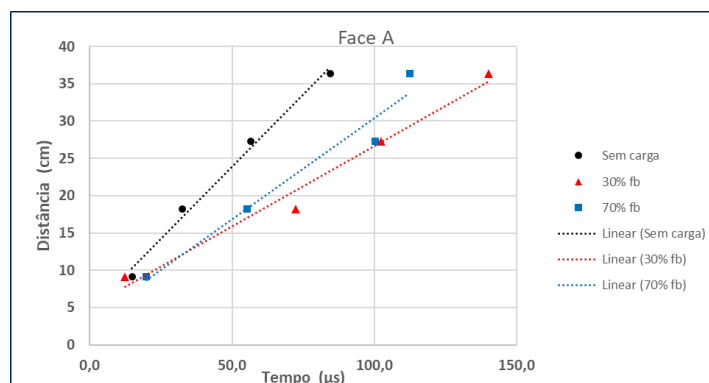
Fonte: Elaboração própria

Figura 64 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 11 de 16,0 MPa – Face B



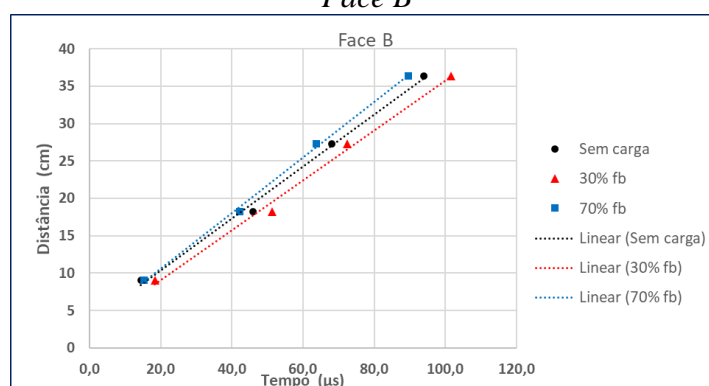
Fonte: Elaboração própria

Figura 65 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 12 de 16,0 MPa – Face A



Fonte: Elaboração própria

Figura 66 – Gráfico com velocidades do pulso ultrassônico para bloco 12 de 16,0 MPa – Face B



Fonte: Elaboração própria

Adotando-se o método direto, os valores calculados de velocidade do pulso ultrassônico para todas as condições de carga são apresentados na Tabela 16.

Ao contrário do que era esperado, as velocidades diminuíram com o aumento de carga. Para 16 dos 18 blocos (88,9%), as maiores velocidades calculadas resultaram para a condição sem carga, e, para a mesma porcentagem de 88,9 %, as menores velocidades resultaram para 70% de fb.

Tem-se, pois, uma tendência extremamente diferente com relação ao ensaio de ultrassom indireto, em que as velocidades aumentavam para cargas maiores, ainda que de forma menos intensa. Uma explicação possível é a de que na região central pudesse ter havido alguma concentração de tensões devido às condições de ensaio, que causassem microfissuras e aumento de vazios nessa região, o que poderia ter como consequência uma diminuição das velocidades.

Tabela 16 – Tabela com as velocidades calculadas dos ensaios de ultrassom direto com e sem pré cargas

Velocidades calculadas (km/s)				
Classe de resistência	Bloco	Sem carga	30% fb	70% fb
4,5 MPa	7	3,42	3,25	2,76
	8	3,43	3,34	3,17
	9	3,39	3,30	3,06
	10	3,47	3,30	3,17
	11	3,48	3,20	3,03
	12	3,26	3,23	3,05
6,0 MPa	7	3,66	3,54	3,19
	8	3,69	3,41	-
	9	3,73	3,64	3,60
	10	3,71	3,59	3,11
	11	3,80	3,58	3,15
	12	3,66	3,54	2,84
16,0 MPa	7	4,27	4,28	4,01
	8	4,30	4,13	3,79
	9	4,40	4,38	4,43
	10	4,44	4,42	4,30
	11	4,42	4,35	4,32
	12	4,48	4,48	4,34

**Para este bloco, não foram medidos os tempos de propagação por dificuldades de laboratório*

Fonte: Elaboração própria

4.4 Ensaio de compressão axial

Na Tabela 17, mostram-se os resultados obtidos para as resistências dos blocos de concreto. Ressalta-se que para todos os blocos, a resistência obtida nunca foi inferior àquela que caracteriza suas classes. Os desvios padrão mostraram-se de baixo valor para as classes de menor resistência (4,5 MPa e 6,0 MPa), sendo o menor valor obtido, de apenas 0,34, para esta última classe. A classe de 16,0 MPa apresentou o maior desvio, de 2,85, porém, em parte, devido a um bloco com comportamento atípico em relação aos demais, o bloco 12, que apresentou resistência de 22,5 MPa, cerca de 81 % da média obtida para o grupo.

Tabela 17 – Resultados estatísticos das resistências dos blocos obtidas em ensaio de compressão

Classe de resistência	Bloco	Resistência (MPa)	Média	Desvio padrão	CV
4,5 MPa	7	6,5	7,8	0,79	0,10
	8	8,4			
	9	7,6			
	10	8,4			
	11	7,5			
	12	8,5			
6,0 MPa	7	11,3	11,0	0,34	0,03
	8	11,3			
	9	11,3			
	10	10,6			
	11	10,7			
	12	10,7			
16,0 MPa	7	28,4	27,8	2,85	0,10
	8	26,7			
	9	30,3			
	10	29,3			
	11	29,5			
	12	22,5			

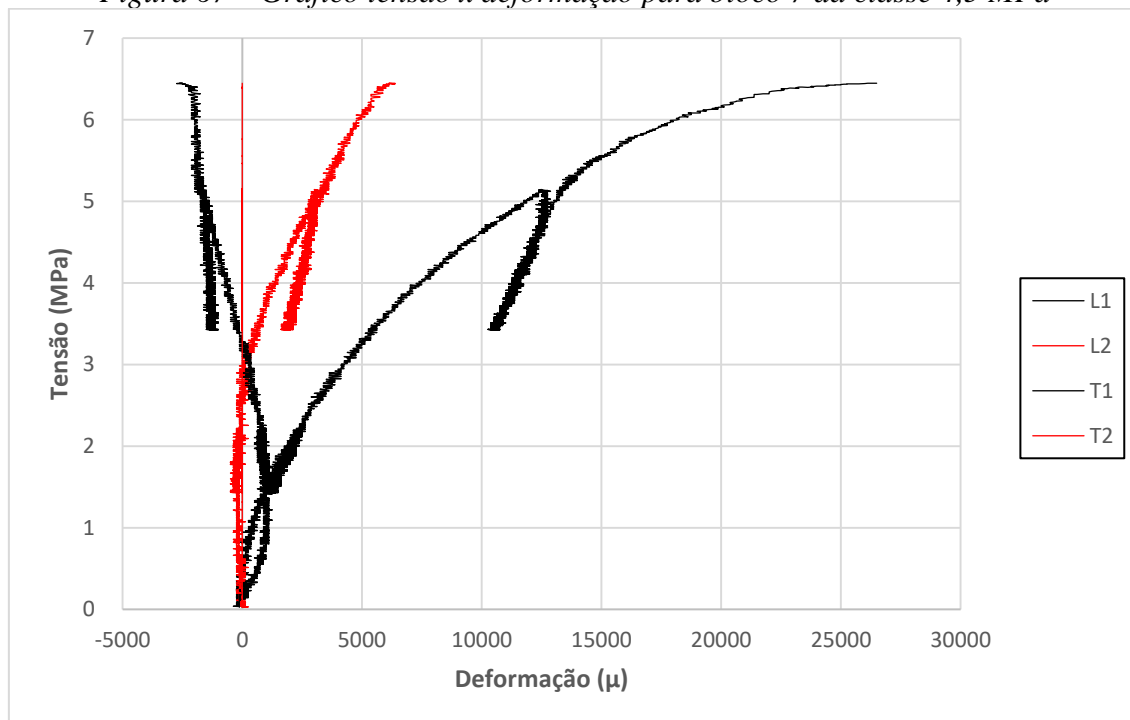
Fonte: Elaboração própria

A seguir, são apresentados os gráficos tensão deformação obtidos nos ensaios com dois blocos de cada resistência, sempre de numeração 7 e 8. L1 e L2 designam os extensômetros responsáveis por medir a deformação longitudinal e, os denominados T1 e T2, responsáveis por aferir a deformação transversal. Os módulos de elasticidade foram estimados partir do nível de tensões correspondentes a 40 % de f_b , conforme resumo da Tabela 18. Os módulos de elasticidade transversais e coeficientes de Poisson só puderam ser calculados para os blocos de 4,5 MPa e 16,0 MPa. Para os blocos de 6,0 MPa, as medições resultaram anômalas, especialmente para o bloco de número 7, em que as deformações transversais registradas foram em sentido contrário ao habitual, isto é, com redução de comprimentos nessa direção.

Os blocos apresentaram módulos longitudinais consideravelmente diferentes, tanto maior quanto maior a resistência da classe, conforme esperado. Os blocos de 4,5 MPa apresentaram módulo longitudinal médio de 6007,64 MPa, os blocos de 6,0 MPa tiveram 10189,66 MPa de média para esta grandeza, e os de 16,0 MPa, módulo longitudinal médio de 24414,45 MPa, mais que quatro vezes o da classe de menor resistência.

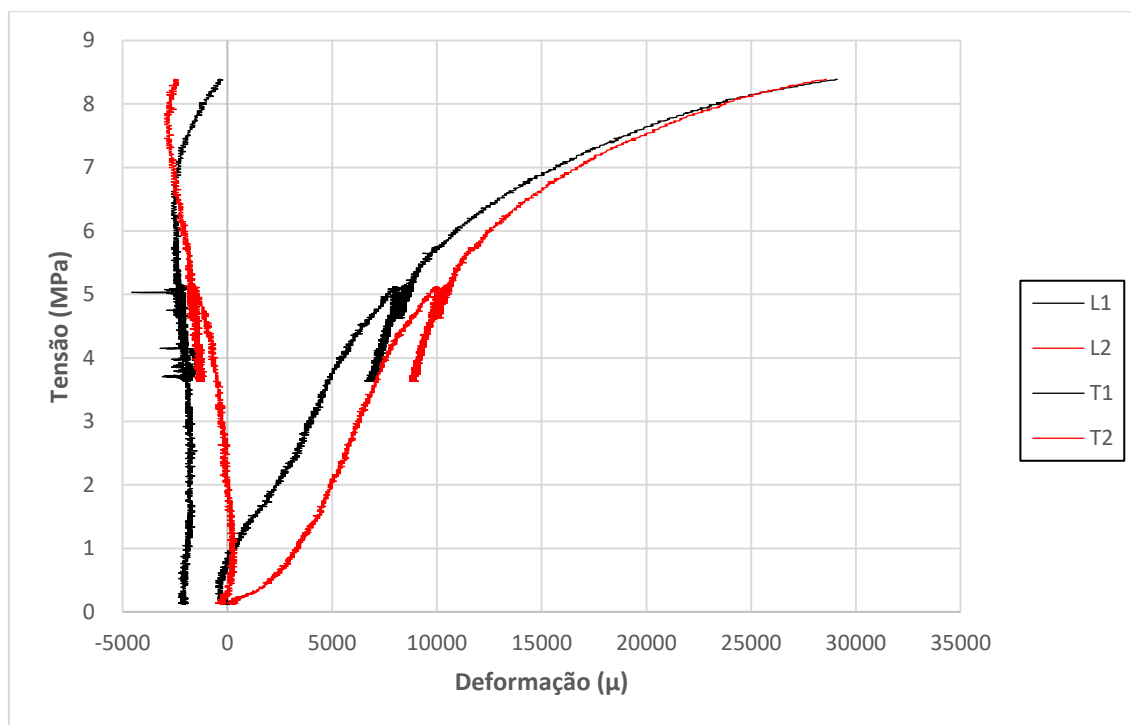
O módulo de rigidez transversal para a classe de 4,5 MPa teve valor médio de 35196,10 MPa, aproximadamente cinco vezes o valor médio do módulo longitudinal para esses blocos, e como consequência o coeficiente de Poisson médio foi de 0,20. Para a classe de 16,0 MPa, o módulo de rigidez transversal teve valor médio de 82325,38 MPa, e o coeficiente de Poisson médio foi de aproximadamente 0,30.

Figura 67 – Gráfico tensão x deformação para bloco 7 da classe 4,5 MPa



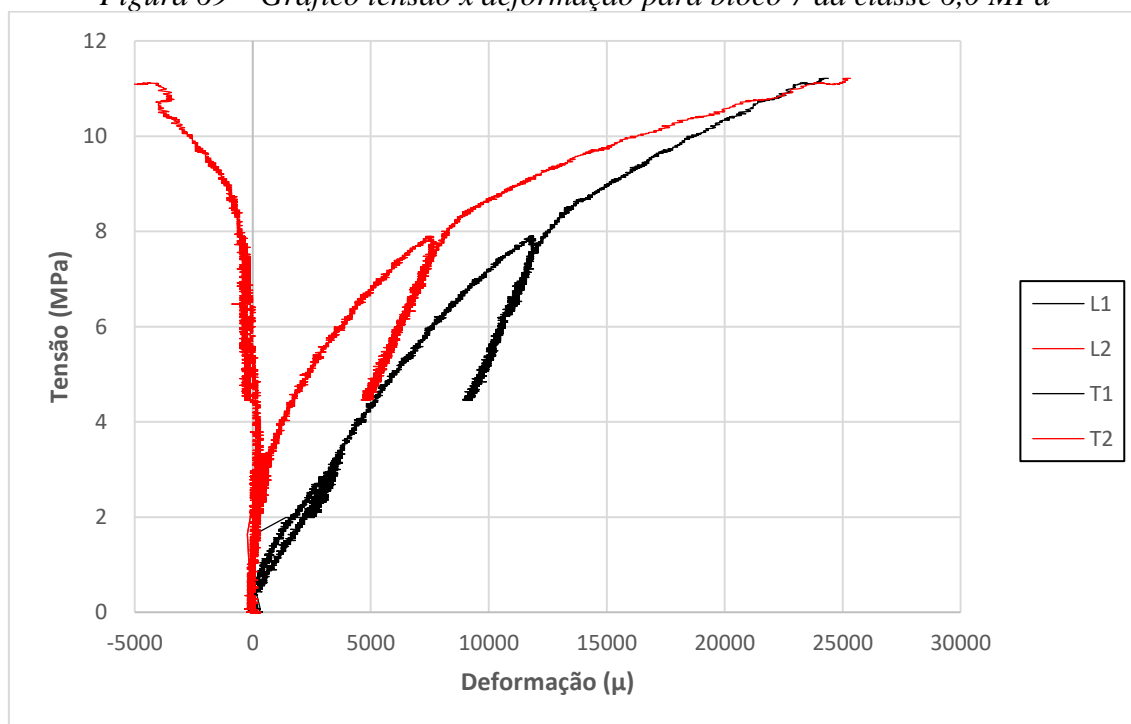
Fonte: Elaboração própria

Figura 68 – Gráfico tensão x deformação para bloco 8 da classe 4,5 MPa



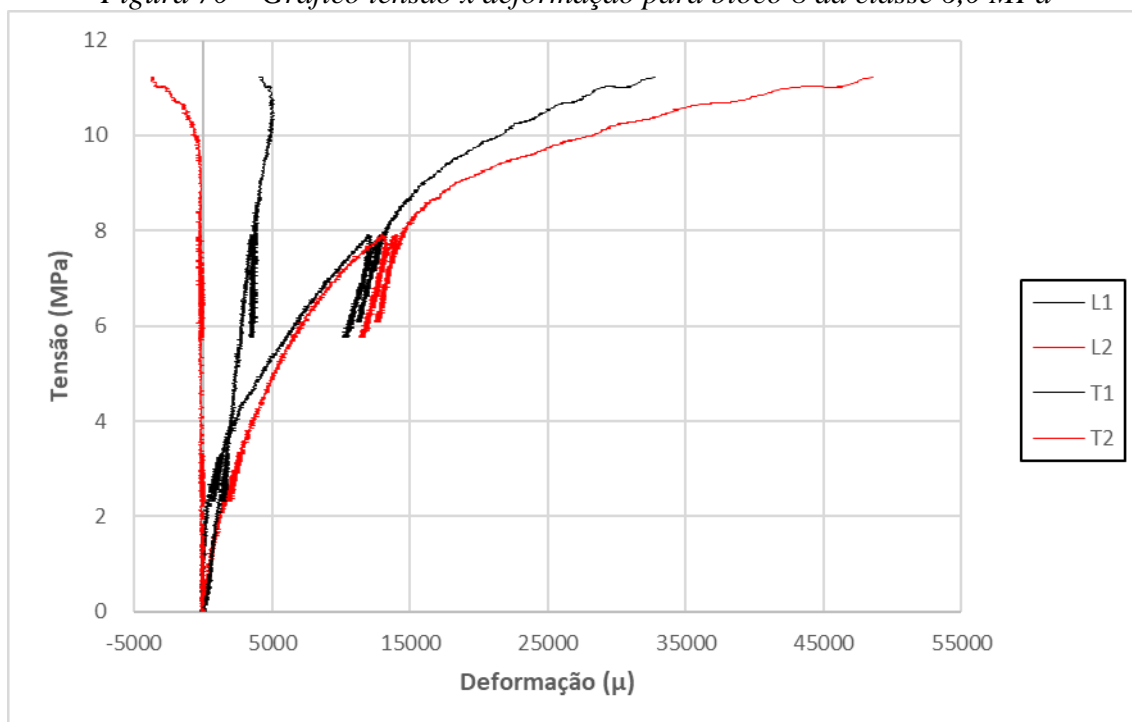
Fonte: Elaboração própria

Figura 69 – Gráfico tensão x deformação para bloco 7 da classe 6,0 MPa



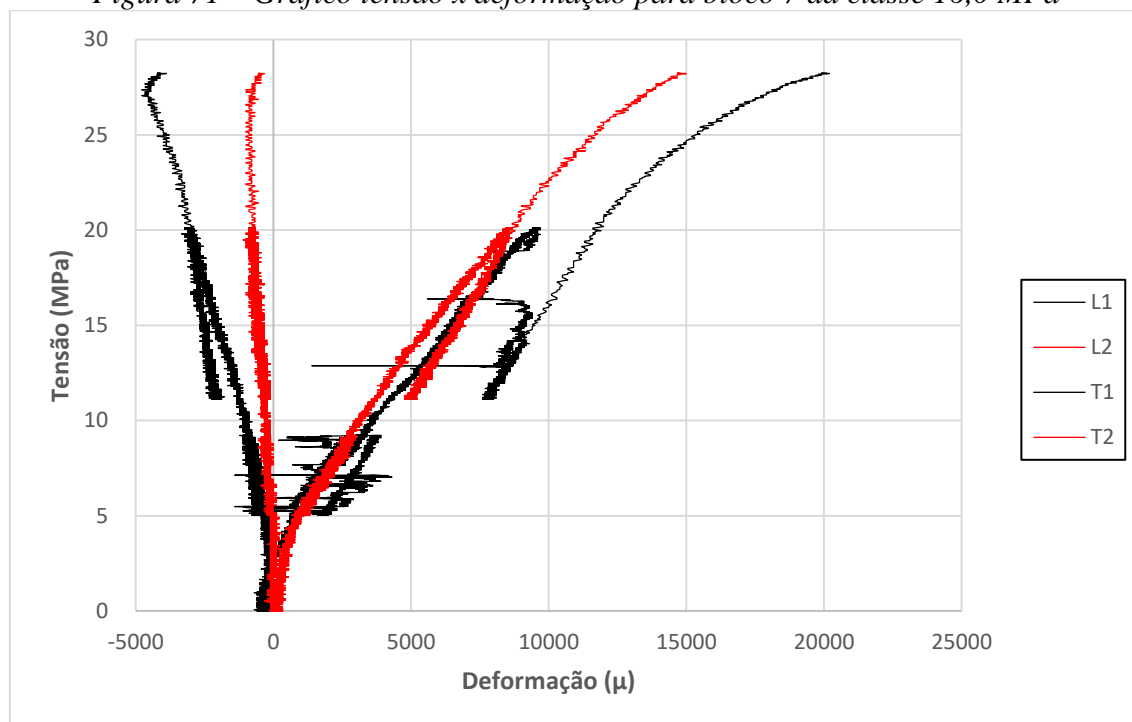
Fonte: Elaboração própria

Figura 70 – Gráfico tensão x deformação para bloco 8 da classe 6,0 MPa



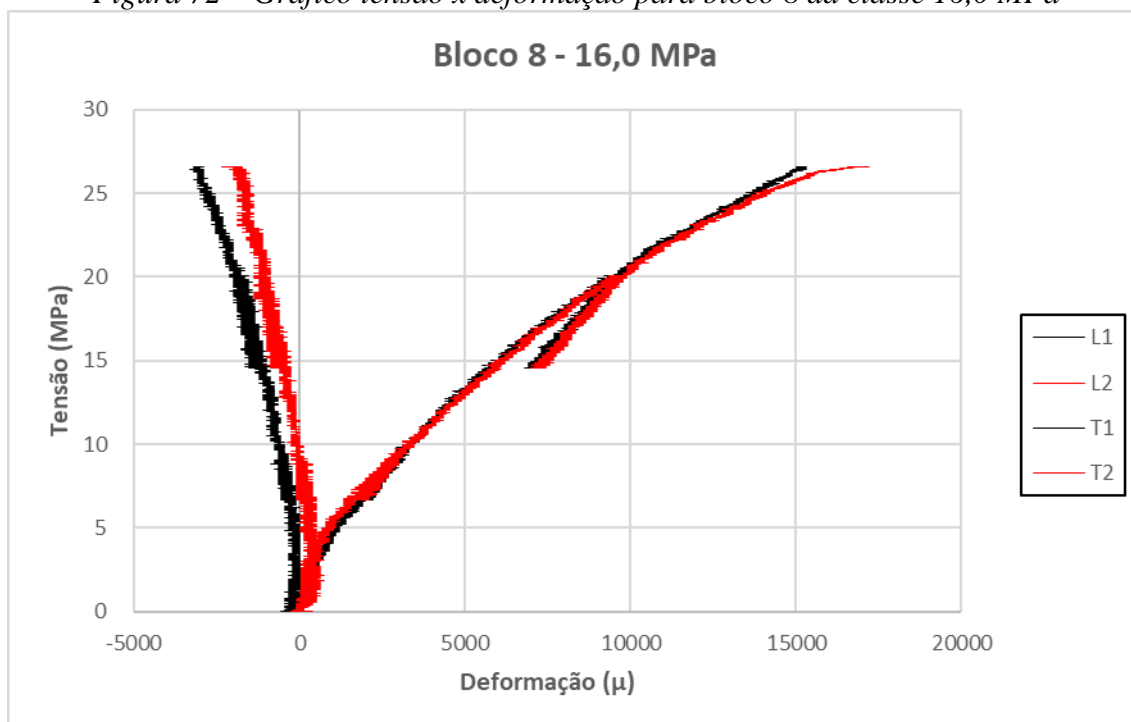
Fonte: Elaboração própria

Figura 71 – Gráfico tensão x deformação para bloco 7 da classe 16,0 MPa



Fonte: Elaboração própria

Figura 72 – Gráfico tensão x deformação para bloco 8 da classe 16,0 MPa



Fonte: Elaboração própria

Tabela 18 – Módulos de elasticidade obtidos para os blocos ensaiados

Classe de resistência	Bloco	Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)	Módulo de elasticidade transversal (MPa)	Poisson
4,5 MPa	7	7039,22	35196,10	0,20
	8	4976,06	23555,76	0,21
6,0 MPa	7	10381,58	-	-
	8	9997,75	-	-
16,0 MPa	7	22591,17	111012,75	0,20
	8	26237,74	53638,01	0,49

Fonte: Elaboração própria

4.5 Correlação entre os ensaios não destrutivos e de compressão axial

A seguir, são analisados os resultados do ensaio destrutivo à luz dos resultados dos ensaios não destrutivos de ultrassom e de dureza superficial.

Para os ensaios de ultrassom indireto, para cada bloco, o valor de velocidade utilizado para a correlação foi a média das velocidades da linha central do bloco (linha 2) para ambas as faces. Esta definição é consequência da análise de seleção dos pontos apresentada anteriormente neste trabalho, conforme item 4. Não foram testadas correlações com resultados do ensaio indireto na vertical pois, quando do ensaio com as pré cargas, em função da prensa, a medição deste tipo foi dificultada, de forma que as medições foram interrompidas.

Para os ensaios de ultrassom direto, para cada bloco, o valor de velocidade utilizado para a correlação foi a média das velocidades da coluna central do bloco (coluna 3). Esta definição também é consequência da análise de seleção dos pontos apresentada anteriormente neste trabalho, conforme item 4.1.

Para os ensaios de dureza superficial, os valores testados nas correlações com as resistências dos blocos foram aqueles calculados no item 4.2, constando das médias dos valores medidos em ambas as faces dos blocos.

A metodologia básica dessa análise será embasada nos gráficos de dispersão com os resultados dos ensaios, que busca aferir o grau de correlação entre o ensaio destrutivo de compressão dos blocos com os dos ensaios não destrutivos.

4.5.1 Ensaio de ultrassom indireto

Para o ensaio de ultrassom indireto, há dados de medição para as três já referidas condições de carga: sem carga, 30% de fb e 70% de fb. Considerando que em eventuais medições *in loco* os blocos sempre estariam sujeitos a algum tipo de carga, mostra-se o gráfico da figura 73 de dispersão considerando os resultados do ultrassom indireto para a condição de 30% de fb e as tensões de ruptura medidas no ensaio de destrutivo. A correlação testada, conforme linhas de tendência no gráfico acima citado, foi do tipo linear.

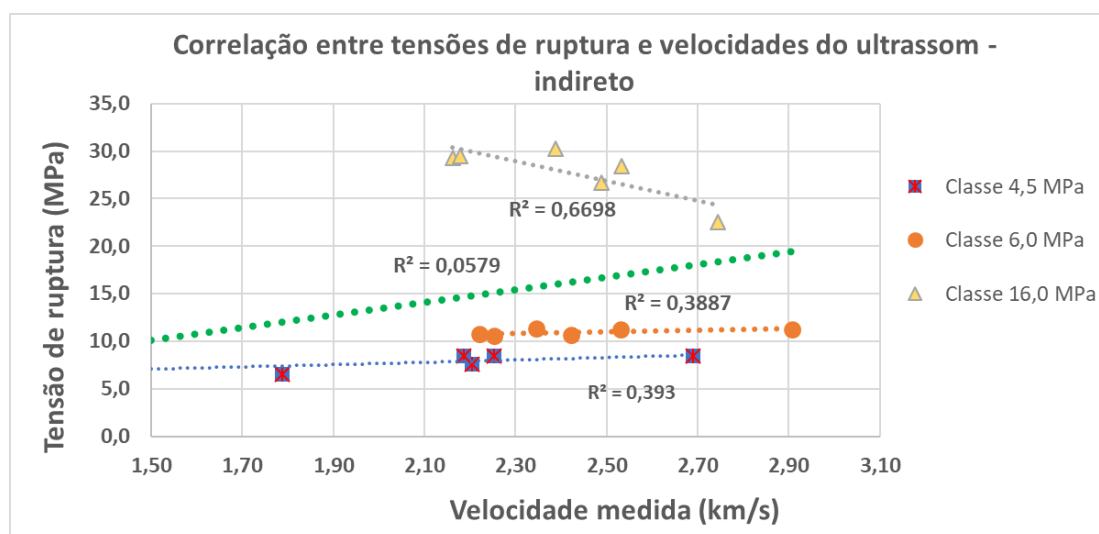
Primeiramente, nota-se que para as classes de 4,5 MPa e 6,0 MPa, as velocidades e as tensões de ruptura mostraram-se positivamente relacionadas conforme esperado, ou seja, as velocidades, em geral, mostram-se maiores quando as tensões de ruptura aumentam, o que de fato não aconteceu para a classe de 16,0 MPa.

Os graus de correlação R^2 resultaram de baixos a médios, com a melhor correlação associada à classe de 16,0 MPa, cujo R^2 é de aproximadamente 0,67. Ao observar cuidadosamente os resultados, os alunos identificaram que os ensaios de ultrassom indireto costumam apresentar grande variação, inclusive quando se medem os mesmos pontos de forma repetida. A linha verde do gráfico da figura 73 mostra a correlação geral dos resultados, sem levar em consideração a classe de resistência; o grau de correlação foi muito baixo, de 5,79 %. Construiu-se, pois, um gráfico de correlação semelhante ao anteriormente citado, porém excluindo os dois blocos que, para cada uma

das classes, apresentaram os valores mais distantes da tendência; isto é, escolheram-se e excluíram-se dois blocos “outliers”, e os resultados são mostrados no gráfico da Figura 74. As correlações melhoram consideravelmente, com um R^2 mínimo de 0,62, para a classe de 6,0 MPa, mas de 0,76 e 0,97 para as classes de 4,5 e 16, respectivamente. Entretanto, a correlação geral, sem consideração de classes de resistência, resultou em praticamente zero.

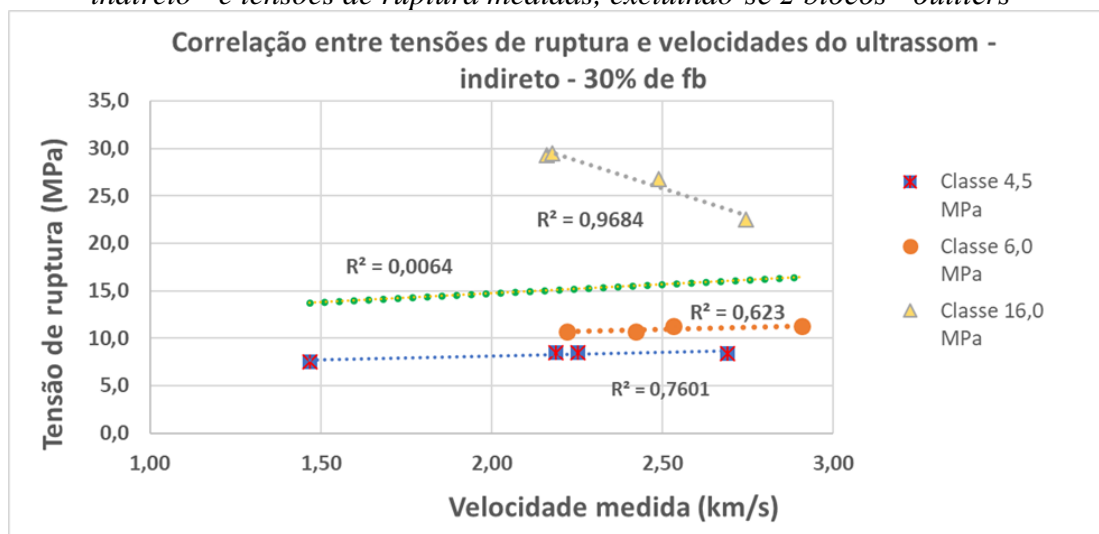
Buscando comparar o desempenho das correlações para todas as situações de carga ensaiadas, para todas elas foram calculadas os R^2 , excluindo-se dois blocos com comportamentos de “outlier” para todas as classes, conforme procedimento acima descrito, e esses dados são resumidos na Tabela 19 no final deste item. A situação de carga que melhor mostrou correlação com as tensões de ruptura foi justamente a de 30 % de fb, com valor médio, conforme explícito no parágrafo acima, de 0,78. Ressalta-se, ainda, que os valores de R^2 sem consideração de classes de resistência melhorou substancialmente, com valores de 0,55 para 70 % de fb e de 0,73 para a condição sem carga. Os coeficientes de correlação obtidos, ainda que com considerável melhoria depois de exclusão dos pontos com comportamento atípico, são inferiores àqueles que o grupo teve como maior fonte de comparação, os de Melo (2016), em que os valores de R^2 obtidos superaram 0,9, ainda que este valor só foi obtido após ajuste estatístico das resistências medidas nos ensaios destrutivos.

Figura 73 – Gráfico de correlação linear entre velocidades do pulso ultrassônico – método indireto - e tensões de ruptura medidas



Fonte: Elaboração própria

Figura 74 – Gráfico de correlação linear entre velocidades do pulso ultrassônico – método indireto - e tensões de ruptura medidas, excluindo-se 2 blocos “outliers”



Fonte: Elaboração própria

Tabela 19 – Tabela com graus de correlação das velocidades do ultrassom indireto R^2 para todas as situações de carga – Cálculo de R^2 desconsiderando até 2 blocos com comportamentos “outlier”

Classe de resistência	Graus de correlação R^2 desconsiderando outliers - Ultrassom indireto		
	Carga considerada		
	Sem carga	30% de fb	70% de fb
4,5 MPa	0,53	0,76	0,10
6,0 MPa	0,14	0,62	0,84
16,0 MPa	0,83	0,97	0,20
Média	0,50	0,78	0,38
Considerando todas as resistências	0,73	0,01	0,55

Fonte: Elaboração própria

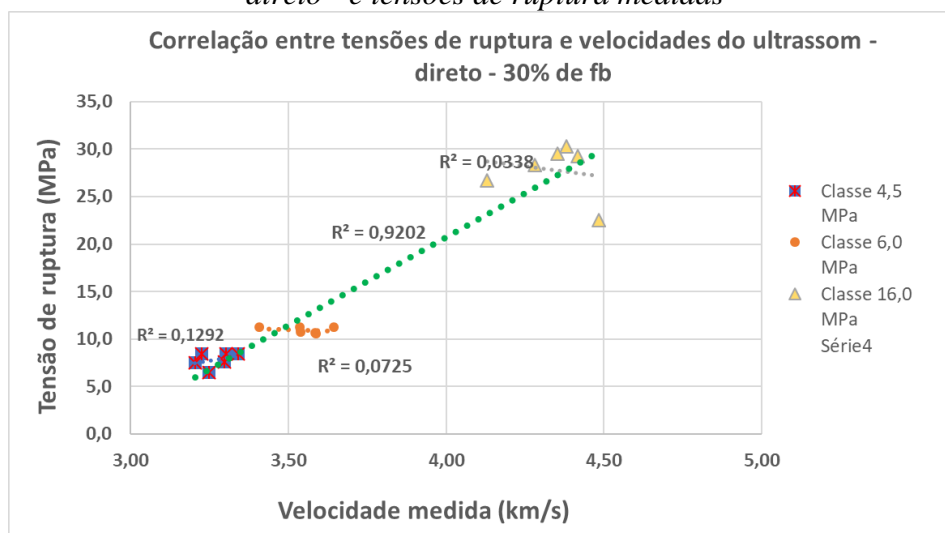
4.5.2 Ensaio de ultrassom direto

Para o ensaio de ultrassom direto, também há dados de medição para as três já referidas condições de carga: sem carga, 30% de fb e 70% de fb. Novamente considerando que em eventuais medições *in loco* os blocos sempre estariam sujeitos a algum tipo de carga, mostra-se o gráfico da figura 75 de dispersão considerando os resultados do ultrassom direto para a condição de 30% de fb e as tensões de ruptura medidas no ensaio de destrutivo. A correlação testada, conforme linhas de tendência no gráfico acima citado, foi do tipo linear.

Considerando as classes de resistência, os graus de correlação R^2 resultaram extremamente baixos e inferiores àqueles obtidos para o método indireto do ensaio de ultrassom, com a melhor correlação associada à classe de 4,5 MPa, cujo R^2 é de aproximadamente 0,12. Entretanto, considerando todos os resultados, sem distinção de classes de resistência, situação demarcada pela linha verde da figura 75, o grau de correlação resultante foi expressivamente satisfatório, com $R^2 = 0,92$. Ainda assim, para aferir a influência de blocos “outliers” nos resultados obtidos, construiu-se um gráfico de correlação semelhante ao anteriormente citado, porém excluindo os dois blocos que, para cada uma das classes, apresentaram os valores mais distantes da tendência, com os resultados mostrados no gráfico da Figura 76. Os graus de correlação aumentaram consideravelmente, com um R^2 geral de 0,97.

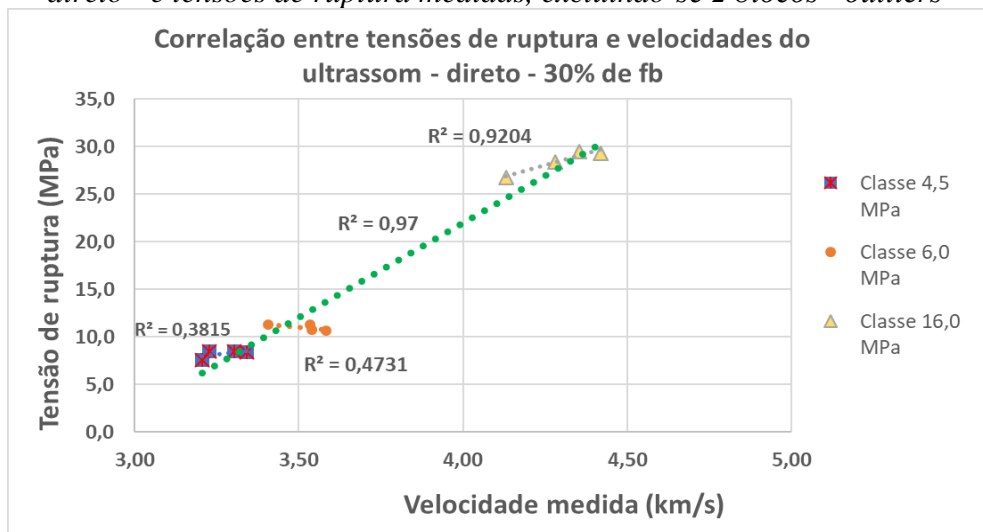
Buscando comparar o desempenho das correlações para todas as situações de carga ensaiadas e de forma análoga àquela feita para o ensaio de ultrassom indireto, para todas elas foram calculados os R^2 , excluindo-se dois blocos com comportamentos de “outlier” para todas as classes, e esses dados são resumidos na Tabela 20, no final deste item. Os resultados mostram um R^2 geral mínimo de 0,87, no caso para a 70 % de fb, o que ainda é um valor alto esta grandeza, o que sugere alto potencial de correlação para este método. Para a condição sem carga, o valor foi ainda mais satisfatório, com $R^2 = 0,98$.

Figura 75 – Gráfico de correlação linear entre velocidades do pulso ultrassônico – método direto - e tensões de ruptura medidas



Fonte: Elaboração própria

Figura 76 – Gráfico de correlação linear entre velocidades do pulso ultrassônico – método direto - e tensões de ruptura medidas, excluindo-se 2 blocos “outliers”



Fonte: Elaboração própria

Tabela 20 – Tabela com graus de correlação das velocidades do ultrassom direto R^2 para todas as situações de carga – Cálculo de R^2 desconsiderando até 2 blocos com comportamentos “outlier”

Classe de resistência	Graus de correlação R^2 desconsiderando outliers - Ultrassom direto		
	Carga considerada		
	Sem carga	30% de fb	70% de fb
4,5 MPa	0,18	0,38	0,99
6,0 MPa	0,05	0,47	0,71
16,0 MPa	0,73	0,92	0,98
Média	0,32	0,59	0,89
Considerando todas as resistências	0,98	0,97	0,87

Fonte: Elaboração própria

4.5.3 Ensaio de dureza superficial

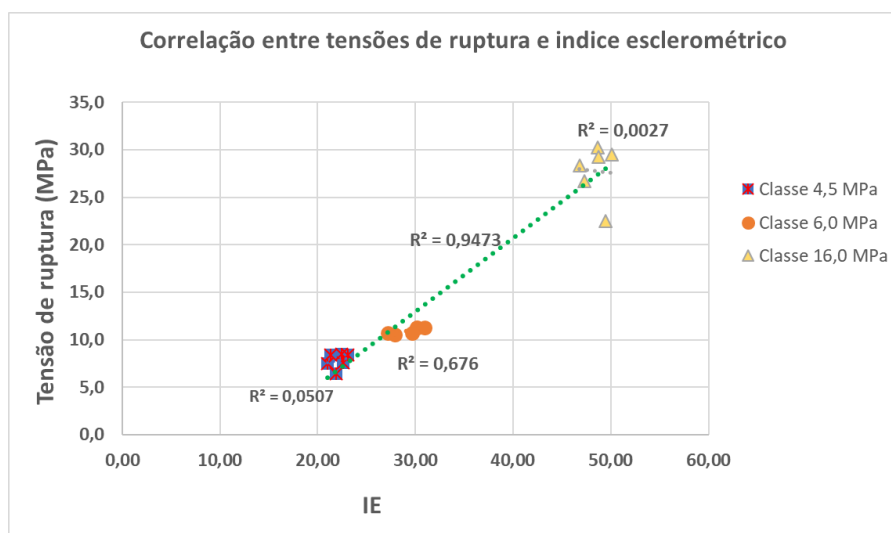
O índice esclerométrico de cada bloco foi definido como a média dos valores obtidos no ensaio para as duas faces do bloco, como uma adaptação a norma NBR 7584:2012. Este cálculo foi abordado e apresentado no item 5.1.2. A partir destes dados, mostra-se o gráfico da Figura 77 de dispersão considerando os resultados dos ensaios de dureza superficial para todos os blocos sem cargas aplicadas e as tensões de ruptura medidas no ensaio de destrutivo. A correlação testada, conforme linhas de tendência no gráfico acima citado, foi do tipo linear.

Os graus de correlação R^2 resultaram extremamente baixos para as resistências de 4,5 MPa e 16 MPa, com valores abaixo de 0,05. Já para os blocos de 6 MPa, os resultados foram melhores, apresentando uma correlação cujo R^2 é de aproximadamente 0,68. Já era esperado que a correlação da classe de 4,5 MPa fosse baixa, visto que este possuía paredes com menores espessuras, além da resistência mais baixa. Dessa maneira, o impacto do esclerômetro poderia causar danos internos aos blocos, interferindo nas medições. Por outro lado, não era esperado que a correlação com a classe de 16 MPa fosse baixa, sendo inclusive menor do que a de 4,5 MPa.

Considerando todos os resultados, sem distinção de classes de resistência, situação demarcada pela linha verde das figuras 77 e 78, o grau de correlação resultante foi muito alto, com $R^2 = 0,95$.

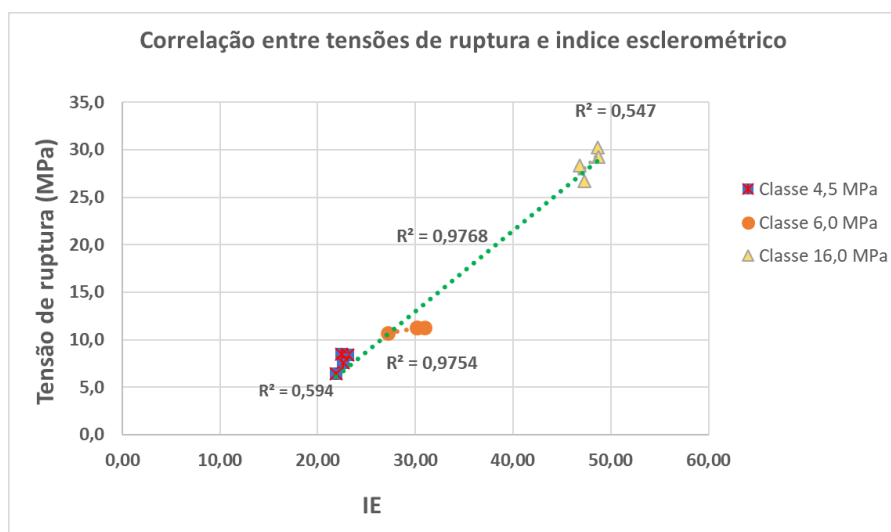
Ainda assim para aferir a influência de blocos “outliers” nos resultados obtidos, construiu-se um gráfico de correlação semelhante aos realizados para ultrassom, excluindo os dois blocos que, para cada uma das classes, apresentaram os valores mais distantes da tendência, com os resultados mostrados no gráfico da Figura 78. Os graus de correlação aumentaram consideravelmente, com um R^2 médio de 0,71 e um R^2 de 0,98 considerando todos os resultados, apresentando uma boa correlação, assim como no ensaio de ultrassom indireto. Nota-se que a correlação para a resistência de 6 MPa foi praticamente 1, mostrando que o ensaio de dureza superficial pode ser capaz de caracterizar, em certo grau, a resistência dos blocos.

Figura 77 – Gráfico de correlação linear entre o índice esclerométrico e tensões de ruptura medidas



Fonte: Elaboração própria

Figura 78 – Gráfico de correlação linear entre o índice esclerométrico e tensões de ruptura medidas, excluindo-se 2 blocos “outliers”



Fonte: Elaboração própria

Tabela 22 – Tabela com graus de correlação dos índices esclerométricos R^2 – Cálculo de R^2 desconsiderando até 2 blocos com comportamentos “outlier”

Classe de resistência	Graus de correlação R^2 desconsiderando outliers - Dureza Superficial
4,5 MPa	0,59
6,0 MPa	0,98
16,0 MPa	0,55
Média	0,71
Considerando todas as resistências	0,98

Fonte: Elaboração própria

5. CONCLUSÃO

Os alunos consideram que este trabalho atingiu os fins inicialmente propostos. Durante as fases 1 e 2 dos ensaios não destrutivos, foi estudada uma metodologia de definição de pontos para realização dos ensaios de ultrassom indireto e direto, e também de esclerometria por meio de uma análise estatística básica baseada nos desvios médios obtidos.

Além disso, foram estudados os resultados dos ensaios não destrutivos de ultrassom, também nas modalidades direta e indireta, para situações em que há uma pré carga atuante sobre os blocos, como ocorre de forma prática em ensaios *in loco*. Tal análise mostrou certa evidência estatística de que as velocidades obtidas nos ensaios, em ambas as modalidades, tendem a aumentar quando de cargas atuantes sobre os blocos, sendo maior o aumento, quanto maiores forem as cargas.

Finalmente, foram estudadas possíveis correlações dos resultados dos ensaios não destrutivos de ultrassom e de dureza superficial com a resistência dos blocos de concreto. No que se refere aos resultados dos ensaios de ultrassom, o grupo obteve resultados extremamente satisfatórios para o método direto, com graus de correlação expressivamente altos, o que sugere grande potencial de correlação com as resistências dos ensaios de compressão. De fato, essa modalidade de ensaio, ao longo de todos os testes realizados pelos alunos, mostrou menor desvio médio que a modalidade indireta. Para o método indireto, os resultados foram inferiores. Para melhor estudar os motivos, entretanto, os alunos sugerem aos pesquisadores que seguirem nesta linha de pesquisa efetuar várias medições para cada um dos pontos medidos nos ensaios e calcular a média, tentando ao máximo evitar que “outliers” impactem significativamente os resultados; ao que os resultados neste trabalho indicam, tal medida pode gerar correlações muito superiores. Já para os resultados dos ensaios de dureza superficial, assim como no ensaio de ultrassom direto, o grupo obteve um grau de correlação de quase 1 quando considerada todas as resistências, mostrando a grande eficiência deste tipo de ensaio.

Com relação a todos os estudos de correlação realizados neste trabalho, sempre foi estudada a correlação linear, sem que fossem testados outros tipos de regressões simples, como exponenciais e de polinômios de maiores graus, como parábolas. O

motivo desse fato foi a pouca quantidade de blocos ensaiados, de forma que se fossem utilizados para as correlações funções de maiores graus de liberdade, os resultados poderiam ser enganosos, na medida em que essas funções adaptar-se-iam às tensões de ruptura de forma não natural, simplesmente por haver maior número de termos independentes nas funções testadas. Entretanto, sugere-se que novos estudos sejam realizados com maior número de blocos, de forma que novos tipos de funções sejam testados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI COMMITTEE 228. (2003). *In-place methods to estimate concrete strength*, [1] ACI COMMITTEE 228. (2003). *In-place methods to estimate concrete strength*, American Concrete Institute, ACI 228.1R.
- [2] ALMEIDA, I. R. (1993). *Emprego do esclerômetro e do ultra-som para efeito da avaliação qualitativa dos concretos de alto desempenho*. Tese para concurso de Professor Titular, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 124p.
- [3] ANDRADE, P. B. (2007). *Estimativa da profundidade de fendas no concreto através da utilização do ultra-Som e do eco-Impacto*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 194p.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto*. Rio de Janeiro. 2014.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (20019). *NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*. Rio de Janeiro. 2019.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014). *NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - requisitos*. Rio de Janeiro. 2014.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2011). *NBR 15961-1: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto Parte 1: projeto*. Rio de Janeiro. 2011.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2011). *NBR 15961-2: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto Parte 2: Execução e controle de obra*. Rio de Janeiro. 2011.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2012). *NBR 7584: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão*. Rio de Janeiro. 2012.
- [10] BUNGEY, J. H. (1989). *The testing of concrete in structures*. 2ª ed. Surrey University Press, Londres.
- [11] CÂMARA, E. (2008). *Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na grande florianópolis através de ensaios não destrutivos*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 212 p.
- [12] EVANGELISTA, A. C. J. (2002). *Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 239p.
- [13] MATA, R, C (2006). *Influência do padrão de argamassamento na resistência à compressão de prismas e mini-paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. 157p.

- [14] MELO, E, V (2016). *Determinação da resistência à compressão em alvenaria de tijolos cerâmico e cimento pelos métodos não destrutivos através de ultrassom e esclerometria*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 112p.
- [15] MOHAMAD, Gihad (2015). *Construções em alvenaria estrutural – Materiais, projetos e desempenho*. São Paulo, Blucher. 2011.
- [16] RAMALHO, M, A. CORRÊA, M, R, S (2003). *Projetos de edifícios de alvenaria estrutural*. São Paulo, Pini. 2011.
- [17] SAHUINCO, M. H. C. (2011). *Utilização de métodos não destrutivos e semi-destrutivos na avaliação de pontes de concreto*. Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 170p.
- [18] STURRUP, V. R., VECCHIO, F. J., e CARATIN, H. (1984). *Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength. In Situ/Nondestructive Testing of Concrete*. Publicação especial SP-82. American Concrete Institute, Detroit. pp 201-228.
- [19] THOMAZ, E. C. S. *Esclerômetro. Notas de aula do Instituto Militar de Engenharia*. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/>. Acesso: 02/06/2019